

А. К. БОГДАНОВА

СГОННО-НАГОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ПОЛОСЕ У ПРИГЛУБОГО ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО БЕРЕГА

Режим прибрежных течений чрезвычайно сложен и весьма изменчив. Это определяется одновременным взаимодействием ряда факторов: непостоянного ветрового режима, влияния изрезанности берегов и рельефа дна, непрерывного изменения наклона урвенной поверхности моря и градиента плотности, обусловленных явлениями сгона и нагона.

В силу такой сложности явления теоретически решить задачу прибрежной циркуляции, с учетом всех действующих факторов, не представляется возможным. Теоретические модели сгонно-нагонной циркуляции основаны на значительном упрощении граничных условий — установившегося ветра и течения, постоянства глубины, прямолинейности береговой черты или упрощенной формы бассейна. Первые шаги в создании теории сгонно-нагонных явлений принадлежат Экману, дальнейшее развитие эта теория получила в трудах В. В. Шулейкина. За последнее время появился ряд теоретических работ: В. Б. Штокмана, Л. С. Лейбензона, Н. А. Багрова, П. А. Киткина, посвященных теории сгонно-нагонного явления. Авторы решают задачу для различных условий, стремясь приблизиться к природным условиям, чтобы раскрыть физическую сущность сгонно-нагонного явления, связанного не только с колебанием урвеня, но и со значительным изменением всего гидрологического режима.

В. Б. Штокман дал решение для установившейся циркуляции вод под воздействием ветра для районов моря, удаленных от берега. Он установил соотношение между силой трения, возникающей в результате действия ветра на водную поверхность, глубиной моря, плотностью воды, углом наклона поверхности моря к горизонту, возникшему в результате ветра.

Л. С. Лейбензон решает задачу установившегося режима ветрового нагона для мелководного моря прямоугольной формы без учета отклоняющей силы вращения Земли.

Работа Н. А. Багрова рассматривает вопрос о развитии и разрушении ветрового нагона при внезапно возникшем, постоянном ветре или после его прекращения также без участия отклоняющей силы вращения Земли и для мелководного моря прямоугольной формы. Он приходит к выводу, что сила трения ветра о воду порождает сейшеобразные колебания вод бассейна, затухающие с течением времени.

Работа П. А. Киткина дает решение для мелководного моря, где глубина меняется по параболическому закону для свободных одноузло-

вых колебаний и для вынужденных колебаний свободной поверхности под действием меняющегося напряжения, возникшего в прилегающем к поверхности моря слое воздуха.

Несмотря на глубокую разработку вопросов непериодических колебаний уровня, эти работы все еще не дают достаточно полного представления о сложной картине сгонно-нагонных явлений, наблюдающихся в природе.

Явления выхода глубинных вод на поверхность или скопление теплых вод вблизи берегов известны с давних времен. Еще Клосовский (1890) указывал, что в установившемся потоке, совпадающем с преобладающим направлением ветра, с правой стороны его скапливаются более теплые, относительно легкие воды, с левой — выступают более холодные воды. В подтверждение им приводится ряд интересных примеров. Так, на поперечном разрезе Гольфстрима изотерма в 10° с левой стороны лежит на глубине 240 м, а с правой — на глубине 416 м; в южной части Балтийского моря температура воды в течение 24 часов при восточном ветре падает с 19° до 6° , в расстоянии же 36 миль от берега температура на поверхности 18° , а температура 6° отмечалась на глубине 70 м. Позже такие явления на Черном море отмечались рядом исследователей: Никитиным и Скворцовым (1926), Книповичем (1933), Ржеплинским (1950) и др. Книпович первый объяснил куполообразное строение вод Черного моря существованием преобладающей системы циклонических течений. На примере Черного моря Книпович развил высказанную ранее точку зрения Клосовского, что в установившемся ветровом потоке справа по движению скапливаются теплые воды, слева — холодные, т. е. у берега располагаются более распресненные воды, слева в центре моря — более соленые. Дальнейшее развитие эта точка зрения получила у Водяницкого (1948), который показал, что преобладающая система течения — циклоническая обуславливает уход в глубь струй, обращенных к берегу и подъем к поверхности внутренних частей струй, обращенных к середине моря. Штокман (1949) теоретически обосновал причины такого перераспределения водных масс, в результате возникновения поперечной циркуляции в дрейфовом потоке, под воздействием силы Кориолиса. Однако Штокман (1951), на наш взгляд, дает неверное объяснение причин, обуславливающих циклоническую систему течений в северном полушарии. Так он говорит: «Часто приходится слышать утверждение, что стационарная циркуляция против часовой стрелки, существующая, например, в Каспийском море, обусловлена тем, что струи Волги и Урала, втекая в северную часть моря, отклоняются вправо под влиянием силы Кориолиса и прижимаются поэтому к западному побережью Среднего Каспия, возбуждая общую циркуляцию против часовой стрелки. В действительности же циркуляция указанного направления вызывается тем, что вода вдоль всей прибрежной полосы замкнутого моря (Каспийского в частности) постоянно распресняется речным стоком. Ширина полосы распреснения изменяется вдоль побережья моря и зависит от интенсивности речного стока в той или иной точке побережья и горизонтального перемешивания. Вследствие наличия полосы распресненной воды, окаймляющей все побережье замкнутого моря, уровень его в прибрежной полосе выше, нежели в центральной части, и поэтому форма поверхности уровня моря напоминает поверхность чаши. При такой чашеобразной форме уровенной поверхности моря, поддерживаемой речным стоком, стационарное движение с участи-

ем кориолисовой силы возможно лишь тогда, когда градиент давления, направленный всюду от берега в море, уравнивается силой Кориолиса, которая должна быть поэтому направлена в противоположную сторону, т. е. от моря к берегу в любой точке прибрежной полосы моря» (1951, стр. 26). Непонятно, почему речные воды при отсутствии течения в море должны растекаться только вдоль берега, а не равномерным слоем по всей площади моря? В Каспии основной сток материковых вод расположен в северной его части, под влиянием каких же сил эти воды должны растекаться только вдоль берегов? Если предполагается, что действует градиент давления за счет наклона уровня, так он направлен с севера, где втекают материковые воды, на юг и если нет других сил, кроме силы тяжести, то пресная вода будет равномерно растекаться по всей поверхности, постепенно уменьшаясь по мере продвижения на юг. На наш взгляд, преобладающая циклоническая система течений в Каспии так же, как и в Черном море, обусловлена ветровым режимом. В дрейфовом потоке благодаря действию кориолисовой силы создается поперечная составляющая течения, направленная к берегу. Именно в результате этой составляющей пресные воды скапливаются вдоль берега, за счет чего и поднимается уровень. Тем самым создается новая сила — градиент давления, который обуславливает в придонном слое поперечную составляющую, направленную в сторону моря. Так возникает замкнутая, поперечная циркуляция, отмеченная самим же Штокманом. Эта поперечная циркуляция и перераспределяет водные массы так, что более легкие теплые и распресненные воды располагаются вдоль берега, т. е. справа от стационарного дрейфового потока, а более тяжелые — слева. Раскрыв структуру дрейфового потока, Штокман в конкретном случае неверно рассматривает причину и следствие явления. Расположение распресненных вод вдоль берега так же, как и повышение уровня, является следствием воздействия силы Кориолиса на дрейфовый поток. В то же время повышение уровня является причиной возникновения поперечной составляющей в придонном слое, т. е. в конечном счете в дрейфовом потоке возникает поперечная циркуляция. Таким образом, повышение уровня у берега является следствием циклонического течения, а не его причиной. Подобно штокмановскому, объяснение циклонического течения в Черном море дает в своих выводах Егорова: «Тяжелая босфорская вода, опресняясь по пути следования и стекая в наиболее глубокие части дна, расположенные в центральных областях Черного моря, вытесняет кверху черноморскую воду. Благодаря поднятию этих глубинных вод в центральных частях моря создается некоторая выпуклость, вызывающая стекание к берегам и мелководьям более соленой, а следовательно, и более тяжелой воды. Относительно тяжелая вода, стекающая к берегам от центральных частей моря, прижимает к берегам опресненную материковым стоком легкую воду и препятствует свободному растеканию ее по всей площади моря. Таким образом, можно предположить, что круговые течения в Черном море возникают благодаря образованию выпуклости в глубоководных частях моря, а не наоборот». (1957, стр. 162). Егорова не упоминает автора, выдвинувшего впервые указанное объяснение, — Шокальского (1934), вероятно, потому, что он после выступления на Международном географическом конгрессе в 1934 г. никогда больше не упоминал об этом, видимо, не желая придерживаться допущенного им ошибочного взгляда. Выпуклое строение вод Черного моря Егорова объясняет вытеснением черноморских вод из области больших

глубин водами средиземноморского происхождения. А существующая система течений есть следствие выпуклого строения изоповерхностей. В силу каких же причин соленые, более тяжелые воды будут располагаться куполообразно, если море находится в состоянии покоя и нет других действующих сил, кроме силы тяжести? Последняя же направлена к выравниванию изостерических поверхностей, следовательно, если в море наблюдается выпуклое строение изоповерхностей, то неизбежно действуют еще какие-то силы, кроме силы тяжести. Кроме того, если даже согласиться с Егоровой и допустить выпуклое строение изоповерхностей как результат выпучивания соленых вод в центральных частях моря, то течение в Черном море должно быть противоположно тому, что наблюдается в нем. Ведь действующей силой при данных условиях должен быть градиент плотности, он же направлен от центра к периферии, следовательно, течение, возникшее под действием градиента плотности, направлено вправо от градиента, т. е. по часовой стрелке. В действительности же преобладающее течение в Черном море направлено против часовой стрелки, т. е. циклоническое. Выводы Егоровой не согласуются и с другими явлениями, наблюдаемыми на Черном море. Известно, например, что наибольшая выпуклость изоповерхностей наблюдается в Черном море в периоды наиболее сильных и продолжительных северо-восточных ветров над морем. При таких ветрах черноморская вода нагоняется в Босфор, сильно снижая приток средиземноморских вод. Были случаи, когда при сильных северо-восточных ветрах нижнебосфорское течение на некоторое время прекращалось. Таким образом, куполообразное строение изоповерхностей бывает выражено тем сильнее, чем слабее нижнебосфорское течение и достигает своего максимума в периоды, когда поступление средиземноморских вод в Черное море минимальное. Наши наблюдения над течением подтверждают современное представление о динамике вод Черного моря, в которой главная роль, бесспорно, принадлежит ветру, являющемуся первопричиной преобладающей системы течений.

Ветер, действующий над поверхностью замкнутого моря, вызывает ветровое течение, которое в большинстве случаев будет иметь нормальную составляющую, направленную в сторону берега или от него, в первом случае, нагоняя поверхностные воды к берегу, во-втором, отгоняя их в море. Наклон уровня создает в придонном слое, а также на границе резкого скачка плотностей, в случае переслоенного моря, нормальную составляющую течения обратного знака по сравнению с поверхностью. Таким образом, в ветровом течении, направленном в замкнутом море вдоль берега, возникает поперечная циркуляция.

Схематически такую циркуляцию водных масс можно представить в виде медленного винтообразного потока, где скорость поступательного движения вдоль береговой черты во много раз превышает скорость вращательного движения. Если стать лицом к морю, то при поступательном движении слева направо вращение происходит на берег, при поступательном движении справа налево вращение происходит в сторону моря, что вызывает в первом случае скопление теплых вод у берега, во втором — их сгон.

Нашими наблюдениями на Черном море установлено, что под влиянием берега течение отклоняется от направления ветра таким образом, что оно стремится к генеральному направлению береговой черты. Поэтому в самой прибрежной полосе (до 2 км от берега) отклонения те-

чения вправо от направления ветра не обнаруживается (1953). Влияние берега здесь намного превышает влияние силы Кориолиса, и поэтому течение следует по ветру, если последний дует вдоль берега, или отклоняется вправо или влево, в зависимости от того, справа или слева от направления ветра находится берег.

В целях выяснения особенностей развития и затухания сгонно-нагонной циркуляции в прибрежной полосе приглубого относительно прямолинейного берега, нами были проведены специальные наблюдения над ветром, течением, уровнем и температурой воды. Для измерения прибрежных течений применялись следующие способы:

1. Наблюдение над поверхностным течением с помощью свободно-плавающих поплавков конструкции Р. Н. Иванова. Их перемещение определялось каждую минуту по перспектометру. Всего в течение 334 дней было выполнено 800 таких измерений.

2. Сбрасывание нескольких поплавков (до 5 штук) со шлюпки и одновременное наблюдение за ними с берега путем поочередного определения их местоположения перспектометром Иванова. Таких измерений течения на протяжении 77 дней выполнено 450.

3. Измерение течений морской вертушкой производилось на 6 вертикалях в расстоянии: 0,3, 1, 3, 5, 7 и 10 км от берега на горизонтах — 0,5, 5, 10, 25, 50 метров и у дна.

4. Непрерывная запись двух компонентов скорости придонного течения (вдоль береговой черты и по нормали к ней) производилась с помощью дистанционного самописца Р. Н. Иванова. Самописец был установлен на расстоянии 0,6 км от берега на глубине 26 м, но работал всего около 40 дней подряд (январь, февраль).

5. Одновременно с наблюдениями над течением производились измерения направления и скорости ветра в месте расположения перспектометра, кроме того, использовались данные срочных наблюдений на метплощадке, расположенной на крыше главного здания Черноморского отделения морского гидрофизического института, а также записи анемоинтегратора Шулейкина В. В., расположенного там же на высоте около 15 м от поверхности земли (5 м над крышей здания). Ленты анемоинтегратора позволили нам постоянно следить за историей ветра и определять средние величины ветрового потока за любой, нужный нам, промежуток времени.

Остановимся несколько подробнее на применявшихся нами способах измерений сгонно-нагонных течений. Методика наблюдения способом сбрасывания поплавка с берега разработана Р. Н. Ивановым и подробно описана им в статье 1953 г. Она заключается в определении прибрежного течения по движению свободно плавающего поплавка (диаметром 8 см) с помощью перспектометра. В штилевую погоду, когда можно спускать шлюпку, такие шары сбрасывались со шлюпки на разном расстоянии: 300, 400, 500, 700 метров, а на расстоянии 1—2 км сбрасывался большой шар. Поплавки, при серийном наблюдении, окрашивались в разные цвета в целях удобства прослеживания их траекторий. Большой поплавок представляет собой полый металлический шар диаметром около 30 см. К нему подвешивался водяной якорь в виде двух крестообразно расположенных квадратных кусков жести со стороны квадрата, равной диаметру шара. Расстояние от центра шара до середины якоря равнялось 1 м. Вся система была уравновешена так, что шар выступал из воды на половину своего диаметра. Расстояние до каждого поплавка в море

и азимут измерялись каждую минуту поочередно перспектометром Иванова, установленным вблизи уреза на высоте около 20 м над уровнем моря. Таким образом, каждый поплавков засекался в серийном наблюдении через 5 минут, в одиночном наблюдении — через 1 минуту. При работе с поплавками, сбрасываемыми со шлюпки, применялся сдвоенный перспектометр Иванова (1953), позволяющий производить измерения местоположения шара с достаточной точностью на расстояниях до 2—3 км. По данным перспектометра, траектории поплавков наносились на план участка моря при помощи специального приспособления Иванова (1953), по которому затем определялись направление и скорость поверхностного течения. При работе с морской вертушкой на расстоянии 0,3 км от берега шлюпка прикреплялась к бую. На всех других станциях шлюпка находилась в дрейфе, и ее местоположение определялось перспектометром с берега таким же образом, как засекался обычный поплавок. При определении истинной скорости течения учитывалась скорость дрейфа шлюпки, засекаемая перспектометром. Вертушечные наблюдения были единственным материалом, по которому можно было судить о распределении скоростей течения по вертикали, от поверхности до дна. Значительным недостатком вертушечного способа измерения течений является большая затрата времени, не позволяющая, в частности, получить картину распределения течений одновременно на различных расстояниях от берега.

Различные способы для измерения течения применялись нами в целях получения более полной характеристики режима сгонно-нагонных течений в прибрежной зоне. Для получения сравнимых данных по течению были проведены параллельные наблюдения за течением различными способами. Так, вначале были проведены наблюдения за скоростью перемещения малых шаров в зависимости от способа прикрепления подвеса при течениях, направленных по ветру и против него. Задача этих наблюдений — найти наиболее целесообразную форму подвешивания полушария, чтобы уменьшить дрейф шара под воздействием ветра на его надводную поверхность. Форму якоря мы не могли изменить, она диктовалась способом забрасывания поплавков в море (минометным выстрелом). Оказалось наиболее целесообразным прикреплять полушарие за его край, в этом случае парусность поплавок была наименьшая. Затем были проведены параллельные наблюдения за малым и большим шарами, к последнему подвешивались различной формы якоря в целях получения сравнимых с малым шаром показаний. Сравнение скоростей течений, определяемых большим поплавком с якорем в форме полушария и крестовины и малым, приведено в конце статьи в таблице 1 и 2.

Анализируя данные наблюдений над течениями и ветром, замечаем, что с достаточной точностью одинаковые результаты получаются по малому и большому шарам в том случае, когда к большому прикреплялась крестовина. Поэтому в дальнейшем использовались именно такие подвесы.

Кроме того, измерялась скорость течения морской вертушкой на глубине 0,5 м со шлюпки, стоящей у буя, который находился на расстоянии 300 метров от берега, на траверзе башни перспектометра. В шлюпке наряду с течением измерялась и скорость ветра (ручным анеометром) для выяснения влияния ветра на движение поплавка. Полученные наблюдения были разбиты на группы в зависимости от того, направлены ли течения по ветру, против него, под большим углом к вет-

ру и, наконец, при штиле. В таблице 3, в конце статьи, приведены данные скоростей течения, определяемых морской вертушкой и малым поплавком. Как видим, отмечается некоторое расхождение в величине скорости течения, измеренной вертушкой и поплавком, причем при попутном ветре — в сторону увеличения, при противоположном — в сторону уменьшения, что объясняется воздействием ветра на выступающую из воды поверхность шара. Случаи, когда течение направлено под углом к ветру, а также отдельные случаи при штилевой погоде, обычно совпадают с периодами смены течения, когда оно меняется по направлению и скорости. Подводный якорь в виде алюминиевого полушария, подвешиваемый на метровой нити к поплавку, уменьшает его парусность, однако дрейф поплавок под воздействием ветра все же значительный. Кроме того, в штормовые погоды продолжительность наблюдений за поплавком сокращается до 10, а иногда и 5 минут, а примерно 5 минут необходимо для растворения сахара, после чего только полушарие отталкивается от шара. Но и при продолжительных наблюдениях у нас нет полной уверенности в том, что полушарие всегда отбрасывалось. При вылавливании отдельных поплавков были случаи, когда чека или полушарие деформировались при выстреле и полушарие задерживалось на шаре. Следовательно, величины скорости поверхностного течения, определяемые шаровыми поплавками, были значительно завышены.

Для того, чтобы выяснить величину ошибки в определении скорости за счет парусности поплавок и перейти от наших наблюдений к истинным величинам, были использованы вертушечные наблюдения для построения графика зависимости отношения скорости течения, измеренной вертушкой u_v к скорости движения поплавок u_n от силы ветра V (Иванов и Богданова, 1953, стр. 46). Однако вертушечные наблюдения были проведены только при небольшом ветре (до 8 м/сек.), к тому же, разброс на кривой связи значительный. По исправленным указанным способом поплавочным данным был построен график связи течений с ветром, он оказался значительно выше, чем у других авторов.

Позже, вернувшись к материалам наблюдений над течением, при составлении данной статьи автору удалось улучшить полученные связи путем теоретического расчета дрейфа. Расчет велся по известной формуле Ньютона лобового сопротивления тела движению жидкости или газа: $F = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2$, где ρ — плотность среды, S — площадь проекции тела на вертикальную плоскость перпендикулярную движению, v — скорость невозмущенного потока и C_x — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса [$C_x = f(R)$], последнее определяется скоростью движения, размерами тела и кинематической вязкостью среды ($R = \frac{U l}{\nu}$). Скорость дрейфа шарового поплавок, наполови-

ну погруженного в воду, рассчитывалась для различных градаций силы ветра из условий равновесия надводного и подводного сопротивления шара воздушному потоку и движению воды, т. е. $\frac{1}{2} C_a \rho_a S (V \pm u)^2 =$

$= \frac{1}{2} C_w \rho_w S v^2$, откуда величина дрейфа шара под воздействием ветра

на надводную половину шара равна: $v = (V \mp u) \sqrt{\frac{C_a \rho_a}{C_w \rho_w}}$. При чем соот-

ношение коэффициентов лобового сопротивления шара воде и воздуху приравнивается нулю на том основании, что число Рейнольдса для воз-

духа и морской воды, при наблюдаемых скоростях ветра и течения, колеблется в пределах 10^4 — 10^5 , а известно, что коэффициент лобового сопротивления шара в области числа Рейнольдса от 10^3 до $3 \cdot 10^5$ меняется весьма незначительно от 0,45 до 0,48. Кроме того, вычисление плотностей воздуха и воды по сезонам показало, что величину отношения плотности воздуха к плотности воды также без большой погрешности можно считать величиной постоянной, равной для Черного моря 0,035. Таким образом, расчетное уравнение для дрейфа шарового поплавка без полушария, наполовину погруженного в воду, приобретает простой вид $v = (V \pm u) \cdot 0,035$ см/сек., где сила ветра и наблюдаемая скорость течения берутся в см/сек. Для вычисления дрейфа шара с подвешенным к нему полушарием мы отобрали только те наблюдения, которые выполнялись одновременно по двум шарам с полушарием и без полушария. Наблюдаемые величины скорости движения поплавков с полушарием и без полушария складываются из истинной скорости течения и дрейфа шаров под воздействием ветра на надводную поверхность шара, т. е. для шара без полушария эта скорость равна: $u_1 = u + v_1$, а с полушарием — $u_2 = u + v_2$, откуда определяется дрейф шара с полушарием: $V_2 = u_2 - u_1 + v_1$ здесь u_2 и u_1 есть наблюдаемые скорости движения поплавков с полушарием и без полушария, v_1 есть дрейф шара без полушария, вычисленный по нашей формуле. Таким образом, по отобранным нами одновременным наблюдениям и была построена кривая связи дрейфа шарового поплавка с подвешенным к нему полушарием для различных градаций ветра (см. рис. 1). Последней мы и пользовались для исключения дрейфа из поплавочных наблюдений.

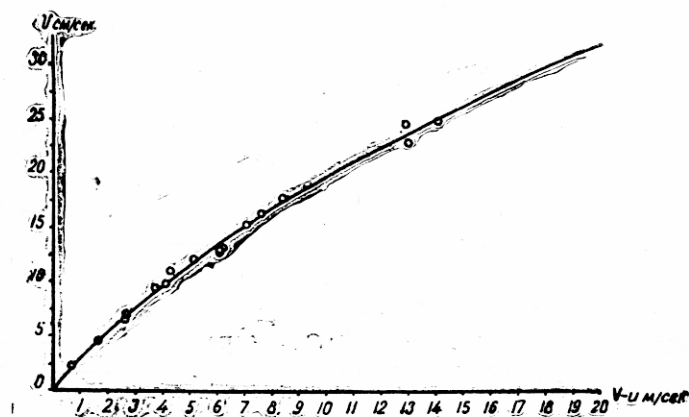


Рис. 1. График связи дрейфа шара (с полушарием) с ветром.

Кривая зависимости скорости поверхностного течения от силы ветра, построенная по исправленным поплавочным наблюдениям, лежит в гуще кривых, построенных по данным других авторов, измерявших течение при помощи различных поплавков (см. рис. 2), у которых подводная часть во много превышала надводную. Сравнение показывает, что исключение ветрового дрейфа даже при наблюдениях в самом поверхностном четырехсантиметровом слое, позволяет получить надежные данные, характерные для слоя, в котором определяются течения другими ме-

тодами, при явном преимуществе возможности наблюдения в штормовую погоду, простоте и изящности метода, требующего 15—20 минут работы наблюдателя.

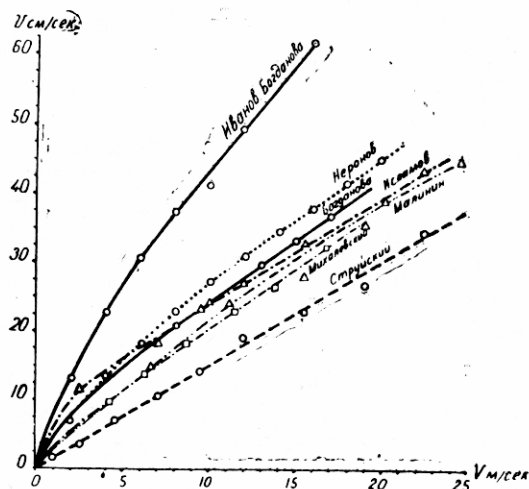


Рис. 2. Кривые связи скорости течения от силы ветра по данным ряда исследователей.

Наблюдения за прибрежными течениями в периоды сгонов и нагонов с помощью описанных выше методов позволили найти величину нормальной и вертикальных составляющих течений, определяющих сгонно-нагонную циркуляцию вод Черного моря. Оказалось, что при нагонном ветре, дующем вдоль берега, течение по всей глубине от поверхности до дна (14—20 м) имеет направление, близкое к направлению береговой черты. По мере увеличения глубины, т. е. с удалением от берега, нормальная составляющая течения в поверхностном слое увеличивается так же, как и нормальная составляющая течения в придонном слое, которая направлена в противоположную сторону. Это увеличение нормальной составляющей течения нами прослеживалось на расстоянии до 2 км от берега (глубина 60—70 м), где проводились одновременно поплавочные наблюдения. При дальнейшем увеличении расстояния, поплавочные наблюдения нами не проводились, но на основании вертушечных наблюдений можно сказать, что примерно с расстояния 2,5—2 км (глубина 70—75 м) нормальная составляющая в поверхностном слое остается постоянной и зависит только от абсолютной величины наблюдаемой скорости течения.

Ниже приводятся конкретные величины скорости поверхностного течения и ее нормальной составляющей, наблюдаемой при нагонном ВСВ ветре 5,5 м/сек., дующем устойчиво в продолжение 8 часов в направлении береговой черты. Наблюдения велись одновременно по 4 поплавкам на расстояниях: 225, 680, 1120 и 1720 метров от берега. Глубина на этих расстояниях соответственно была около 15, 50, 65 и 75 метров. Наблюдаемые скорости: 20, 21, 22 см/сек. направлены в основном вдоль берега слева направо, если смотреть на море. Нормальные составляющие на поверхности были направлены в сторону берега и изменялись следующим образом: +0,5, +9, +12 см/сек. При том же направлении ветра со

средней скоростью в 7,3 м/сек, работавшего в продолжение 32 часов течение, наблюдаемое одновременно на расстояниях 260, 390, 650, 2500 метров, где глубины соответственно 10, 20, 45, 80 м, было: 36, 50, 51 и 62 см/сек. Нормальные составляющие течения —1,2, —2,0, +5,0 и +6,2 см/сек., и направлены до расстояния 400 м в море, дальше в сторону берега. Таким образом, для ВСВ ветра, дующего точно параллельно берегу, нагонная составляющая течения с удалением от берега увеличивается и направлена в сторону берега.

Для нагонного ветра, направленного с берега на море под небольшим углом к берегу, в нашем случае СВ ветер, течение вблизи берега также направлено вдоль берега и имеет нормальную составляющую в сторону берега. Так, при небольшом СВ ветре 2,8 м/сек., дующем в продолжение 9 часов на расстояниях 200, 290, 500 и 750 метров, где глубины 10, 15, 30 и 40 метров, течение было: 17, 18, 21 и 22 см/сек., нормальные составляющие соответственно равны +1,5; 3,0; 5,2 и 8,2 см/сек. При этом же ветре в 5 м/сек. поверхностное течение по одновременным наблюдениям над поплавками на расстояниях 250, 300, 480 и 700 метров, где глубины 15, 20, 40 и 55 м было: 44, 36, 51 и 62 см/сек., нормальные составляющие —8, —3, +3 и +18 см/сек. Здесь, как и при ВСВ ветре, нормальная составляющая имеет вблизи берега даже обратное направление, но с удалением от берега она быстро уменьшается и, перейдя через нуль, принимает направление на берег и постепенно увеличивается.

Для сгонного ветра, дующего с моря под небольшим углом к береговой черте, наблюдается обратная картина. Вблизи берега нормальная составляющая в поверхностном слое равна нулю или даже положительная, т. е. направлена в сторону берега. С увеличением расстояния она меняет знак, т. е. поворачивается в сторону моря и постепенно увеличивается. Например, при ЮЗ ветре 5 м/сек., работающем в продолжение 2,5 суток, течение по одновременным наблюдениям на расстояниях 235, 400, 495, 680 и 1020 метров, где глубины 15, 30, 40, 50 и 63 метра, было: 14, 24, 20, 62 и 64 см/сек., а нормальные составляющие — соответственно +4, —4, —6, —16 и —28 см/сек., т. е. до расстояния 250 метров нормальная составляющая направлена на берег, примерно на 300-х метрах равна нулю, а дальше меняет знак на обратный, т. е. направлена в море и постепенно увеличивается. При ЮЗ ветре 6,8 м/сек., дующем в продолжение суток, течение, при одновременных наблюдениях на расстояниях 195, 250, 450 и 645 метров, где глубины 15, 20, 40 и 50 метров, было 17, 17, 15 и 15 см/сек., а нормальные составляющие 0, —1, —2 и —6 см/сек., т. е. направлены в море.

Для сгонного ветра, направленного с берега на море под небольшим углом к береговой черте, наблюдается совершенно аналогичная картина. Так, при 3 ветре, дующем в продолжение 2 суток, течение, направленное в основном справа налево, по одновременным наблюдениям на расстояниях 290, 620, 1.160 метров, где глубины 15, 50, 65 метров, было 22, 23, 30 см/сек., а нормальные составляющие +3, —1, —2 см/сек., т. е. примерно до расстояния 300 метров от берега нормальная составляющая положительная, дальше она меняет свой знак и становится направленной в сторону моря. Следовательно, при работе сгонных ветров течение в прибрежной полосе, в основном, направлено вдоль берега справа налево, если смотреть на море с берега и в поверхностном слое имеет нормальную составляющую скорости, которая, начиная с расстояния 300—

400 метров, направлена в море и увеличивается с удалением от берега.

Абсолютные величины скорости течения зависят от силы и продолжительности сгонного или нагонного ветра, от размера акватории моря над которой он работает, а также от величины остаточного течения. Так как наблюдения большей частью выполнялись при неустановившемся режиме течения, абсолютные величины наблюдаемых скоростей не одинаковы и колеблются в каком-то пределе, о чем указывалось в работе 1953 г. В таблице 4 в конце статьи приводятся величины изменения скорости поверхностного течения и его нормальной составляющей с удалением от берега, указываются сила ветра и его продолжительность, глубина моря в месте наблюдения течения. Знак + указывает направление составляющей течения в сторону берега, знак — в сторону моря.

Как видно из таблицы 4, абсолютные величины сгонной и нагонной составляющих течения в поверхностном слое возрастают от берега в море от 0—5 см/сек., вблизи берега до 6—12 см/сек., а иногда и выше, на расстоянии 1—2 км от берега. В процентном отношении к истинной скорости, наблюдаемой в поверхностном слое, нормальная составляющая колеблется в широких пределах, достигая иногда 50% от наблюдаемой скорости. На рис. 3 приведены кривые изменения тангенциальной составляющей ветра, уровня и температуры по прибрежным наблюдениям. Там же нанесены векторы поверхностного течения и их нормальных составляющих по одновременным наблюдениям на разных расстояниях от берега. На графике четко вырисовывается наличие связи течения, уров-

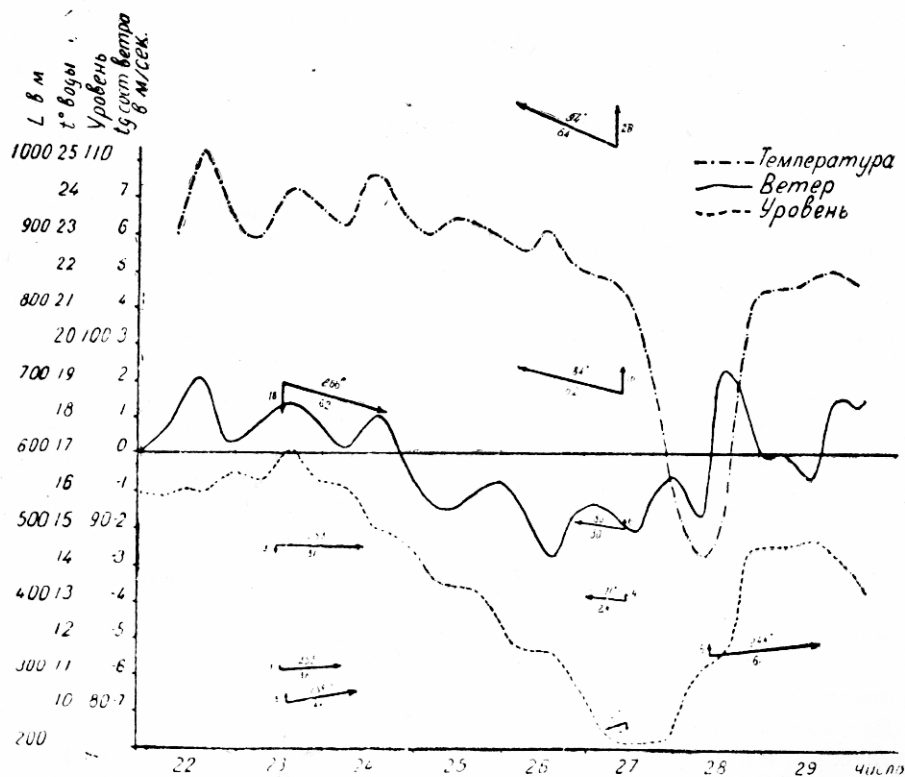


Рис. 3. Кривые изменения тангенциальной составляющей ветра, уровня и температуры по прибрежным наблюдениям.

ня, температуры воды с действующим ветром. Течение меняется за ветром спустя 6—12 часов, несколько запаздывает изменение уровня и, наконец, изменяется температура воды (при сгонах), спустя сутки — вдвое от начала работы сгонного ветра. Время запаздывания температуры от ветра зависит не только от силы и продолжительности ветра, но и от толщины прогретого слоя. На рис. 3 легко прослеживается изменение направления нормальных составляющих течения с удалением от берега как при нагонном, так и при сгонном ветре. В обоих случаях в расстоянии 300—400 метров от берега отмечается смена в направлении нормальных составляющих течения, при этом при нагонах образуется зона сходимости поверхностных течений, при сгонах — зона расходимости. Скорость поверхностного течения в обоих случаях несколько уменьшается в этих областях, и они характеризуются погружением вод при нагонах и подъемом при сгонах.

На основании непрерывной записи нормальной и тангенциальной составляющих течения придонным самописцем удалось проследить за поведением нормальной составляющей течения в придонном метровом слое при сгонных и нагонных ветрах. Для нагонных В, ВСВ и СВ ветров, течение в самом придонном слое имеет тангенциальную составляющую, направленную так же, как и в поверхностном слое, на запад, а нормальную составляющую направленную в обратную сторону, т. е. в море. Запись составляющих придонного течения самописцем выполнялась в зимнее время (январь, февраль), когда вода в прибрежном районе была хорошо перемешана от поверхности до дна. При устойчивом СВ ветре через 18 часов с момента его возникновения, течение в придонном слое наблюдалось западное силой 14,5 см/сек., с нормальной составляющей 0,5 см/сек. в сторону моря. Через 37 часов течение у дна — 17 см/сек и нормальная составляющая — 1,5 см/сек. направлена также в сторону моря.

Для сгонных ветров (З, ЗЮЗ и ЮЗ) течение в придонном слое восточное, т. е. имеет тангенциальную составляющую, направленную так же, как и в поверхностном слое, а нормальную составляющую, направленную в противоположную сторону, т. е. на берег. Так сгонный ЮЗ ветер, дуящий в продолжение 13 часов, создал течение в придонном слое — 14 см/сек., тангенциальная составляющая направлена на восток так же, как и в поверхностном слое, а нормальная составляющая +2 см/сек. направлена в противоположную ей сторону, т. е. на берег. Для более подробной характеристики величины и направления нормальной составляющей в придонном слое в зависимости от разных ветров, в конце статьи приводится таблица 5 тангенциальной и нормальной составляющих течения по данным придонного самописца за январь, февраль 1949 г.

Непрерывная запись течений в придонном слое подтверждает, что при устойчивых нагонных ветрах течение по всей толще воды направлено вдоль берега слева направо, но если в поверхностном слое нормальная составляющая направлена в сторону берега, то в придонном слое она направлена в сторону моря.

При устойчивых сгонных ветрах, наоборот, течение направлено вдоль берега справа налево, нормальная составляющая в придонном слое направлена к берегу, в то время как в поверхностном слое она направлена в море. Абсолютная величина нормальной составляющей в придонном слое еще меньше, чем на поверхности. Максимальная скорость, записан-

ная за 40 дней, равна 8 см/сек. (при нагонном ветре), направлена в сторону моря. В большинстве случаев нормальная составляющая в придонном слое бывает равна 1—3 см/сек. В отдельных случаях нормальная составляющая в придонном слое так же, как и в поверхностном слое, имеет обратное направление, т. е. при сгонном ветре — в сторону моря, а при нагонном — в сторону суши. Это наблюдается в тех случаях, когда течение еще не установилось, а только формируется.

Весьма важным фактором в механизме сгонов и нагонов является вертикальная составляющая течений. Выходы холодных вод у берегов или скопление теплой воды, заполняющей все пространство от поверхности до дна, свидетельствует о наличии вертикальной составляющей течения, но порядок величины ее настолько мал, что не поддается обычным способам измерений. Однако на основании наблюдений над быстрым изменением температуры воды на одном и том же горизонте, вызванном явлением сгона, можно косвенным путем рассчитать вертикальную составляющую скорости течения по времени поднятия или опускания теплой, или холодной воды. Нам могут возразить, что при таком определении вертикальной составляющей скорости течения мы допускаем ошибку, так как сюда же включается перемещение, вызванное турбулентной теплопроводностью. Конечно, это так, но известно, что величины изменения температуры за счет вертикальной составляющей скорости течения имеют совершенно другой порядок. Если перемещение изотерм за счет турбулентной теплопроводности за несколько часов определяется сантиметрами, то при ярко выраженном нагоне перемещение изотерм за такой же промежуток времени определяется метрами и десятками метров. Это подтверждается температурными разрезами, выполняемыми через день при отсутствии сгонно-нагонного явления и в период сгонов. Следовательно, быстрое перемещение изотерм по вертикали во время сгонов и нагонов определяется в основном вертикальной составляющей течения. По абсолютной величине вертикальная составляющая течения очень невелика — порядка нескольких долей миллиметра (0,1—0,3 мм/сек.). Инструментально измерить ее до последнего времени не удавалось. Однако путем расчета по времени перемещения определенной температуры по вертикали можно составить представление о порядке величины вертикальной составляющей течения во время сгонно-нагонного явления. Так, например, 5 июня 1950 г. в 12 час. 20 мин. температура 16° наблюдалась на глубине 13 метров. Через 33 часа 25 мин. эта температура поднялась на глубину 2 метров, т. е. за 33 часа 25 мин. вода поднялась на 11 метров. Следовательно, вертикальная составляющая скорости течения равна 0,55 см/мин. или 0,09 мм/сек. Вертикальная составляющая, вычисленная таким образом по наблюдениям от 9 августа 1950 г., дает величину скорости, равную 0,17 мм/сек. В настоящее время под руководством А. Г. Колесникова сконструирован прибор для измерения флюктуаций и вертикальных градиентов температуры и течения, который может быть использован и для определения вертикальных составляющих течения.

Несмотря на то, что величины вертикальной составляющей скорости течения очень малы, вызванные ею перемещения водных масс во время сгонно-нагонных явлений свидетельствуют о ее большом значении в вертикальном перемешивании вод Черного моря. Так, при скоростях вертикальной составляющей в 0,1—0,3 мм/сек. за сутки через горизонтальное

28 Тр. Севастоп. биол. ст., т. XII

сечение, равное 1 кв. метру, проходит от 8 до 24 кубометров воды.

Зная величину составляющих течения и продолжительность работы сгонного ветра определенной силы и направления, можно рассчитать, с какой глубины должна подняться вода за тот или иной промежуток времени. При слабом сгонном ветре (3—5 м/сек.), работающем в продолжение 3—4 дней, мы наблюдали течение антициклонического характера, со скоростью около 15—20 см/сек., имеющее нормальную составляющую 0,5—1,5 см/сек., в сторону моря в поверхностном слое, и в обратном направлении в придонном слое, и вертикальную составляющую 0,05—0,09 мм/сек. от дна к поверхности в прибрежной зоне и в обратном направлении в центрах круговых течений. Следовательно, за 4 дня вода в прибрежной полосе поднялась с глубин 15—30 метров. При ветре в 6—9 м/сек. и течении 20—30 см/сек. нормальная составляющая была равна 1—2 см/сек., вертикальная составляющая 0,1—0,2 мм/сек., т. е. за 4 дня вода в прибрежной зоне поднялась с глубины 30—65 метров.

В практике наблюдений неоднократно приходилось сталкиваться с очень интересным явлением, когда после продолжительной работы устойчивого сгонного или нагонного ветра отмечается значительное уменьшение скоростей течения, а в отдельных случаях и смена его на обратное. Обратное течение захватывает широкую прибрежную полосу (наблюдения проводились в километровой прибрежной полосе), длится оно 3—4 часа, после чего вновь меняется на прежнее. Для примера приведем два случая, когда устойчивый ВСВ ветер продолжался трое суток. В таблице 6, в конце статьи, приводятся данные, когда отмечается уменьшение скорости течения на третий сутки, без ослабления силы ветра. Течение измерялось на второй и третий день работы ветра. В таблице 7 приводятся наблюдения, когда при устойчивом и продолжительном ветре отмечается не только затухание, но и смена течения на обратное на некоторое время. В продолжение 12, 13, 14 и 15 июля 1950 года работал устойчивый 3—3ЮЗ ветер, под действием которого возникло сгонное течение, достигшее к 17 часам 13 42 см/сек. Однако 14 июля отмечается уменьшение скорости течения до 22 см/сек., хотя ветер даже несколько усилился, а утром 15 течение сменилось на обратное и было направлено навстречу ветру, но уже к 14 часам оно вновь изменило направление и совпадало с ветром. Наблюдения велись синхронно по пяти поплавкам, захватывавшим прибрежную полосу в 800—1.000 метров.

Объяснение указанного явления, нам кажется, нужно искать в следующем: в результате продолжительной работы нагонного или сгонного ветра создается не только наклон физической поверхности моря, что для открытого побережья выражается повышением или понижением уровня на 6—12 см, но сопровождается значительным наклоном изостерических поверхностей, по нормали к берегу и в сторону, противоположную наклону уровенной поверхности, что обуславливает плотностное течение, направленное вправо от градиента плотности, т. е. в сторону, противоположную течению, вызванному наклоном уровня моря.

Вблизи берега на ветровое течение накладываются течения, вызванные вновь возникшей силой — наклоном уровенной поверхности моря и наклоном слоя скачка плотностей; и то и другое неразрывно связано со сгонно-нагонными явлениями. Первые — увеличивают ветровые течения, т. к. они направлены примерно в ту же сторону, вторые — уменьшают их.

При развитии и затухании сгонно-нагонных течений соотношение между наклоном уровня и наклоном слоя скачка плотности меняется, отчего меняется и величина наблюдаемого течения. Результирующий вектор при одной и той же силе и направлении ветра будет определяться соотношением величин градиента давления и градиента плотности. Причем в начале работы ветра подток вод по поверхности и верхней границе слоя (для нагонного ветра) будет интенсивнее, чем отток по нижней границе слоя и у дна, и, следовательно, течение будет в основном определяться ветром и градиентом давления, связанным с наклоном уровня поверхности. Придонное течение, а при наличии слоя скачка температуры, и течение на нижней границе прогретого слоя, определяемое тем же градиентом давления, приведет к наклону слоя скачка и возникновению градиента плотности, что в свою очередь скажется на уменьшении скорости течения и на изменении его нормальной составляющей.

Таким образом, становится понятной природа колебания направления и скорости течения даже при продолжительной работе ветра одного направления. Для установившегося потока наступает равновесие между тангенциальным напряжением ветра, наклоном уровня (градиентом давления) и градиентом плотности. Однако это равновесие быстро нарушается, так как первопричина всех этих изменений — ветер не остается постоянным. Не удивительно поэтому, что Неронов¹⁾ из 21.900 наблюдений, выполнявшихся регулярно через 4 часа в продолжение 12-летнего периода, отобрал только 38 случаев течения, которое он отнес к установившемуся. Поэтому для получения связи между силой ветра и установившейся скоростью течения необходимо использовать не конкретные наблюдения, а осредненные величины как ветра, так и течения для продолжительного промежутка времени работы ветра относительно устойчивого по силе и направлению. Именно эти средние величины и будут характеризовать установившийся режим течения.

При смене относительно установившегося прибрежного течения на противоположное, под влиянием изменившегося ветра, оно не затухает до нуля, а постепенно поворачивается, причем меняется течение вначале у самого берега, а затем уже мористее. Поворот течения в таких случаях осуществляется в сторону берега при смене нагонного — по часовой стрелке, при смене сгонного — против. В обоих случаях нормальная составляющая течения в момент поворота направлена на берег. Новое течение достаточно быстро распространяется в сторону моря. Рассмотрим случай, когда продолжительно действующий ВСВ ветер, создавший относительно устойчивое течение, сменился сгонным ЮЗ. На рис. 4 нанесены траектории поплавков, по одновременным наблюдениям на разных расстояниях от берега, для нагонного течения, для периода смены течения, происходящей спустя 8 часов после смены ветра ВСВ на ЮЮЗ—ЮЗ и, наконец, для сгонного течения установившегося после смены ветра. Траектории поплавков, заснятые в 9 часов 29 мая 1950 г., дают картину относительно установившегося нагонного течения. Вблизи берега на расстоянии от 230 до 400 метров скорость нарастает быстро от 36 до 50 см/сек., дальше в море величина скорости остается почти постоянной, но отклоняется в сторону берега, приобретая нагонную составляющую + 5,5 см/сек. На том же рис. 4 заснята

¹⁾ Из работы Белинского Н. А. 1950, Морские гидрометеорологические информации и прогнозы.

движения поплавков в период смены неустановившегося сгонного течения даны на рис. 5.

Итак, в период смены сгонного ветра на нагонный сгонное течение меняется с поворотом в сторону моря (по часовой стрелке), если течение было неустановившееся, и в сторону берега, если оно было установившееся. В первом случае период сгона увеличивается, включая в себя и период смены течения, во втором случае — уменьшается, так как во время смены нормальная составляющая течения направлена уже на берег. То же самое отмечается и при смене нагонного течения на сгонное, если течение было установившееся, то поворот происходит по ча-

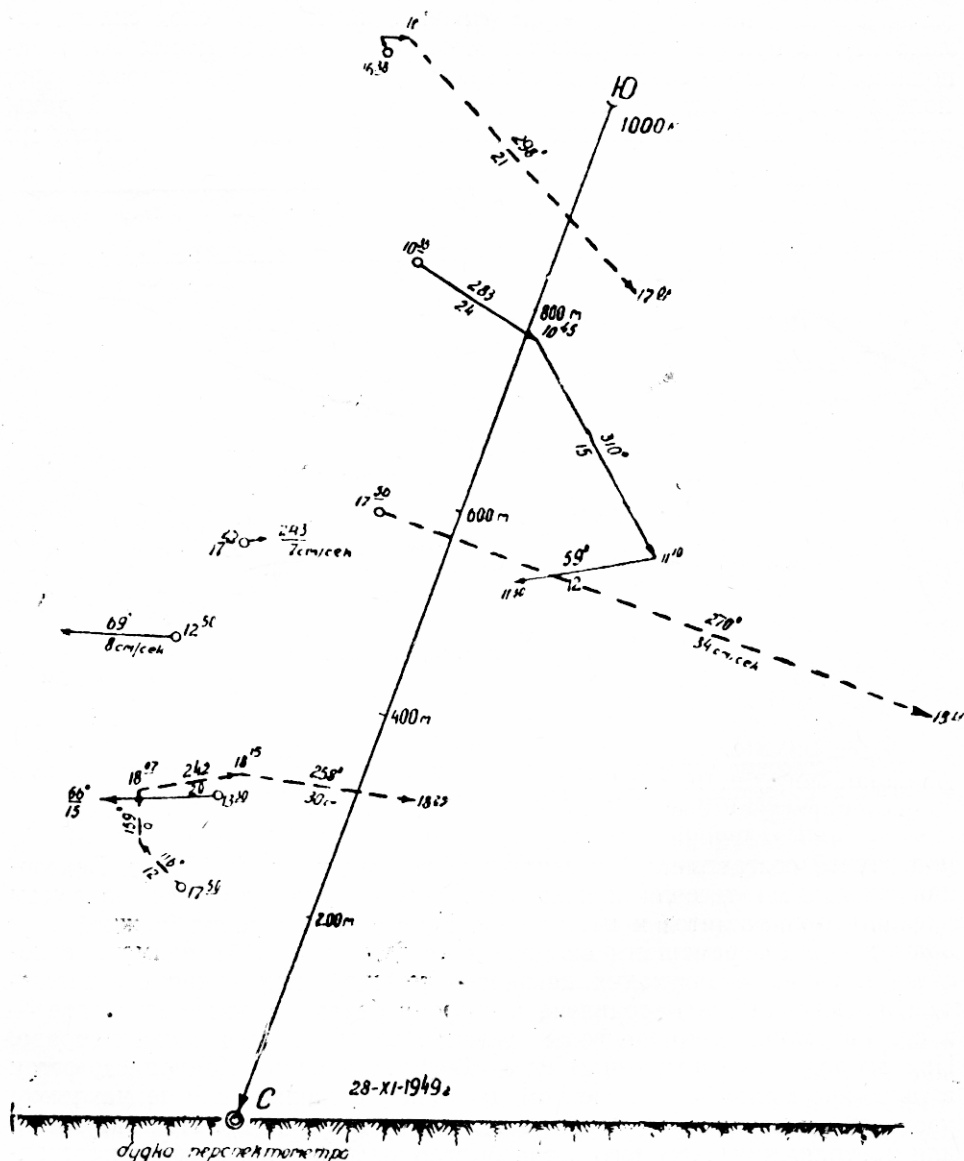


Рис. 5. Траектории движения поплавков в период смены неустановившегося сгонного течения.

совой стрелке, если смена происходит при неустановившемся течении, то в период смены нормальная составляющая течения направлена в море и нагонное явление несколько уменьшается.

По вертушечным наблюдениям над течением прослежено, как меняется нормальная (или поперечная) составляющая течения по глубине. Замечено, что при разных гидрологических условиях она ведет себя различно. Так, в холодное время года, когда конвекционное перемешивание выравнивает температуру и соленость поверхностных вод (до глубины 50—60 м в открытой части моря и 75—100 м в прибрежной части¹⁾), характер изменения нормальной составляющей по глубине указывает на наличие поперечной циркуляции в сгонном или нагонном потоке, охватывающей весь хорошо перемешанный слой (до слоя скачка солености). В прибрежных районах обычно однородные массы воды заполняют все живое сечение от поверхности до дна, и, следовательно, поперечной циркуляцией охвачена вся толща воды. На рис. 6 даны векторные диаграммы течения и годографы вертикального изменения

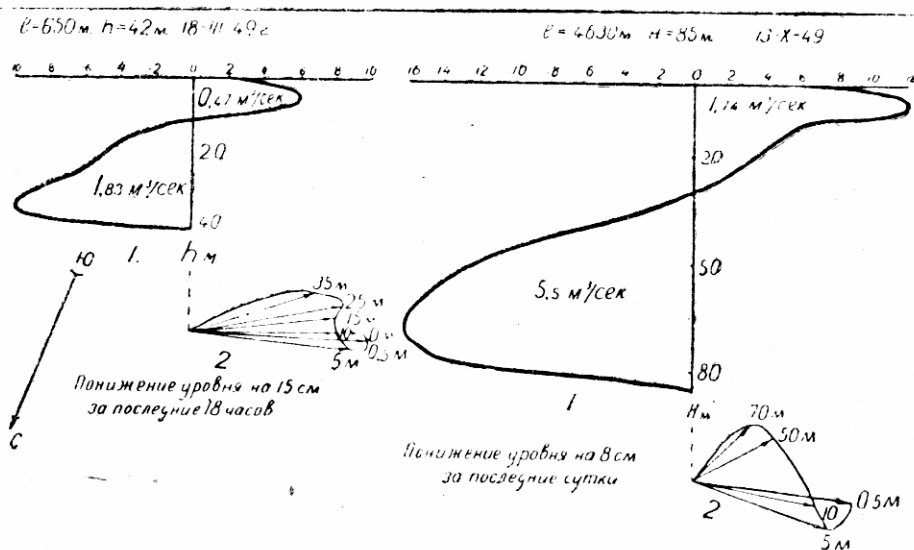


Рис. 6. Векторные диаграммы течения и изменение нормальных составляющих течения по вертикали для зимнего периода по вертушечным наблюдениям.

поперечной составляющей течения для ноября и марта 1949 г. Векторная диаграмма течения напоминает экмановскую, полученную путем теоретических расчетов и построений. В этот период в прибрежной зоне воды хорошо перемешаны от поверхности до дна. Оба примера относятся к случаям затухания нагонного течения, поперечная составляющая на поверхности направлена в сторону берега, в придонном слое — в сторону моря, в толще воды течение вдоль берега слева направо. Приток вод в поверхностном слое обусловлен силой Кориолиса, отток в придонном слое — градиентом давления, в данном случае наклоном уровня поверхности с берега в море и трением о дно. При затухании или прекращении нагонного ветра быстро уменьшается нагонная состав-

¹⁾ Книпович, 1930, стр. 33, 1933, стр. 58, 136.

ляющая течения в поверхностном слое, в то время как нормальная составляющая в придонном слое еще сохраняется, пока не выровняется уровень. Следовательно, в момент затухания явления нагона, количество воды, притекающей в поверхностном слое, меньше, чем количество воды, оттекающей в придонном слое. Что и отмечается нашими наблюдениями над течением и показаниями мареографа. Количество притекающей воды в поверхностном слое через вертикальную площадку шириной в 1 м и высотой по толщине слоя, поставленную параллельно берегу, на первой станции равно 0,49 куб. м/сек., оттекающей в придонном слое — 1,83 куб. м/сек. На второй станции — притекающей воды 1,74 куб. м/сек., оттекающей — 5,5 м³/сек. Для первого случая отмечается понижение уровня на 15 см за последние 18 часов, для второго случая — понижение уровня на 8 см в течение последних суток. В таблице приводятся величины наблюдаемых скоростей и их нормальные составляющие по вертушечным наблюдениям.

Таблица

Ст. 18-III 1949 г., в расст. 650 м от берега, глубина 42 м				Ст. 13-XI 1949 г. в расст. 4630 м от берега, глубина 85 м			
Н м	Течение		Нормальная сост. течения см/сек.	Н м	Течение		Нормальная сост. течения см/сек.
	напр. град.	ск. см/сек.			напр. град.	ск. см/сек.	
0	248	48	+1,5	0	—	—	—
0,5	251	50	+4,0	0,5	255	45	+6,0
5	254	45	+6,0	5	267	40	+12,0
10	248	41	+1,0	10	258	36	+6,0
15	242	41	—3,0	25	250	36	+2,0
25	238	44	—6,0	50	210	26	—12,0
35	230	36	—10,0	70	205	24	—16,0
42		0	0	85		0	0

В период, когда в Черном море наблюдается четко выраженный слой температурного скачка, поперечная циркуляция в сгонно-нагонном потоке осуществляется послойно. На рис. 7 даны векторные диаграммы течения и годографы изменения поперечных составляющих течения, характерных для переслоенного моря. Наблюдения относятся к июлю 1950 г. Поперечные составляющие течения здесь направлены в сторону берега на поверхности (глубина 0—5 м), затем поперечная составляющая уменьшается, переходит через нуль и на глубине 10—25 метров имеет направление в сторону моря, на глубине 50 метров поперечная составляющая направлена вновь к берегу, а на 70 м в сторону моря. Именно наличием послойной циркуляции и объясняется тот факт, что теплая вода никогда не подтекает под холодную, а холодная не натекает на теплую, как бы продолжительно ни работал нагонный или сгонный ветер. Изменение направления поперечной составляющей течения на нижней границе хорошо перемешанного слоя обуславливается градиентом давления и трением. Трение в слое резкого нарастания плотности вызывает такой же эффект, как трение о дно при однородной водной массе. Градиентное течение на границе слоя резкого нарастания

плотности отклоняется от направления градиента на угол меньший 90° , т. е. приобретает составляющую в сторону градиента давления (последний направлен с берега в море при нагоне и с моря на берег — при сгоне), т. е. в сторону, противоположную отклонению, вызванному силой Кориолиса. Течение под слоем резкого нарастания плотности складывается из градиентного и дрейфового, возникающего под воздействием тангенциальной силы трения движущегося вышележащего слоя воды,

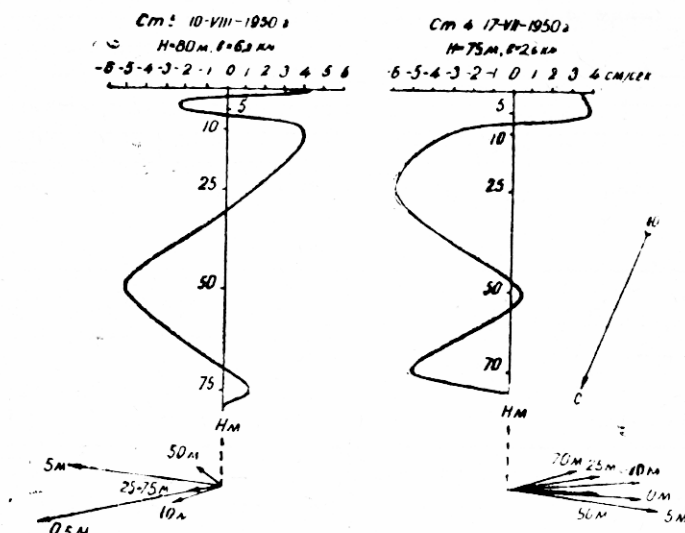


Рис. 7. Векторные диаграммы течения и изменение нормальных составляющих течения по вертикали для летнего периода (при наличии слоя скачка температуры) по вертушечным наблюдениям.

поэтому оно и будет отклоняться вправо от направления движения указанного слоя под влиянием силы Кориолиса, ниже глубины трения, течение, определяемое градиентом давления, направлено вправо под углом 90° от градиента, т. е. вдоль берега. Таким образом, в каждом слое возникает поперечная циркуляция, которая и осуществляет перераспределение водных масс в сгонно-нагонном потоке. Для установившегося сгонно-нагонного потока между действующими силами: тангенциальной силой трения, силой Кориолиса, градиентом давления и градиентом плотности наступает равновесие. Однако в природе, особенно в прибрежной полосе, равновесие наступает только на непродолжительное время так, как первичная действующая сила — ветер весьма непостоянна.

Изменение характера поперечной циркуляции в сгонно-нагонном потоке приводит к поднятию или опусканию глубинных вод в периоды сгонов и нагонов. В зимнее время, когда работают более сильные и продолжительные ветры, глубина, с которой поднимаются воды, значительно больше, чем летом, когда поперечная циркуляция осуществляется послойно. Охлаждение вышедших в поверхностные слои глубинных вод способствует более глубокому их опусканию при прекращении сгона в соответствии с их увеличенной плотностью. Именно благодаря этому в зимнее время влияние сгонно-нагонных явлений на вертикальное перемешивание усиливается.

Анализируя гидрологические разрезы, выполненные нами в различные моменты сгонов и нагонов, нетрудно заметить, что в центрах циклонических течений и завихрений, в районах сгонов, в местах расположения гребня внутренней волны отмечается поднятие как скачка температур, так и скачка солёности с одновременным увеличением градиента плотности в них. И, наоборот, в центрах антициклонических течений, в районах нагонов и в местах расположения подошвы внутренней волны, как правило, наблюдается заглубление слоя скачка температуры и слоя холодной прослойки с одновременным увеличением толщины этих слоев и уменьшением градиента температуры и солёности в них. Замеченные связи динамики промежуточных слоев резкого нарастания плотности с системой течений указывают на то, что в потоке переслоенных водных масс Черного моря поперечная циркуляция осуществляется послойно. Уменьшение толщины слоя резкого нарастания плотности в центрах циклонических течений и увеличение толщины его в центрах антициклонических течений возможно только при условии, что величина поперечной составляющей течения на верхней границе слоя несколько больше, чем на нижней, что подтверждается приведенными выше фактическими величинами нормальных составляющих течений. В результате в центре циклонического течения приток в каждом слое больше оттока, что и приводит в первом случае к уменьшению толщины слоя скачка плотности, во втором — к его увеличению. На рис. 8 дается схема поперечной циркуляции при сгонах и нагонах, на ней отображены прибрежные области сходимости и расходимости поверхностных течений, отмеченные при поплавоочных наблюдениях в расстоянии 300—400 метров от берега (см. рис. 3). Наличие послойной поперечной циркуляции в сгонно-нагонном

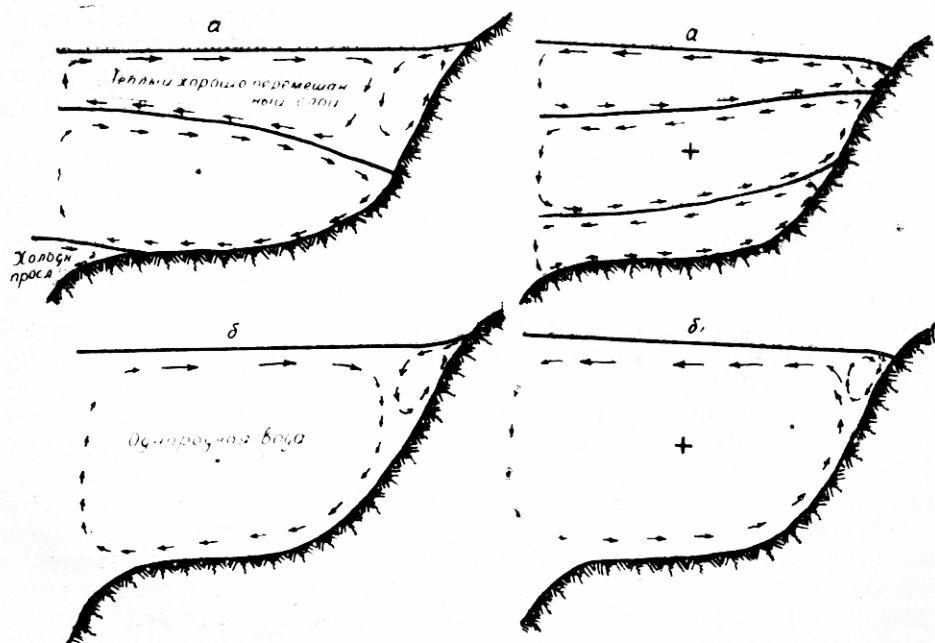


Рис. 8. Схема поперечной циркуляции при сгонах и нагонах для летнего и зимнего периодов.

потоке не исключает вертикального перемешивания между поверхностными и глубинными водами. Оно осуществляется на границах слоев и распространяется по вертикали от слоя к слою, на что указывал В. А. Водяницкий в своей схеме вертикального обмена вод Черного моря (1948). Чем устойчивее стратификация водных масс, тем медленнее осуществляется вертикальный обмен. В зонах утолщения слоев скачка температуры или солености, характеризующихся уменьшением вертикальных градиентов, перемешивание между слоями увеличивается. Особенно оно увеличивается при выходе слоя скачка на поверхность моря при сгонах, когда градиенты между поверхностной теплой и вышедшей на поверхность холодной водой уменьшаются более чем в сто раз по сравнению с вертикальными градиентами в слое скачка температуры.

Итак, сгонно-нагонные явления, наблюдаемые у берегов в виде колебания уровня и резкого понижения температуры воды, являются следствием поперечной циркуляции, возникающей в дрейфовом потоке. Наиболее ярко сгоны и нагоны проявляются на Черном море в тех случаях, когда над всем морем устанавливается сгонная или нагонная система ветров. В таких случаях возникают устойчивые круговые течения, которые сопровождаются не только изменением уровня и температуры воды вблизи берегов, но в результате поперечной циркуляции большого масштаба, происходит значительное перераспределение водных масс в большой толще на всей площади моря. Эти перемещения воды хорошо прослеживаются на гидрологических разрезах по распределению температуры, солености, кислорода, фосфатов и др.

Как известно, при сильных нагонных ветрах, захватывающих все Черное море, вдоль побережья устанавливается течение, направленное против часовой стрелки, оно охватывает широкую прибрежную полосу и затухает с некоторого расстояния по направлению в море. Эти течения образуют в Черном море два основных круговорота циклонического характера в западной и восточной части моря и ряд более мелких колец, обусловленных неоднородностью поля ветра, рельефом дна и конфигурацией берегов.

При такой системе течений поперечная циркуляция перемещает водные массы на поверхности в направлении с моря на берег, а на нижних границах слоев — от берега к центру моря. Это приводит к нагону теплых вод к берегам, и, как компенсация оттока воды в центрах циклонических систем течений, происходит подъем глубинных вод (в каждом слое). В результате получается то куполообразное строение изоповерхностей, которое впервые было отмечено Н. М. Книповичем и которое чаще наблюдается в Черном море в результате преобладания нагонной системы ветров (северо-восточных на севере и юго-западных на юге моря). Такое распределение ветровых потоков особенно ярко проявляется при развитии сибирского антициклона, усиливающегося зимний муссон. Над Черным морем в это время наблюдается термическая депрессия, которая время от времени углубляется за счет проникновения сюда средиземноморских циклонов, заполняющихся обычно над юго-востоком моря. Аналогичные нагонные ветровые поля возникают над Черным морем и при смене муссонов под воздействием усиливающегося Азорского максимума, частные ядра которого перемещаются с запада на восток над югом Украины.

В тех случаях, когда средиземноморские циклоны перемещаются по более северным траекториям (с северного Причерноморья на Кубань или среднюю Волгу), над Черным морем устанавливается ветровое поле

с обратным — сгонным распределением ветровых потоков (южные, юго-западные и западные ветры на северном побережье моря). Такие ветровые поля наблюдаются над Черным морем и при выходе сюда западных и северо-западных циклонов, что в холодную половину года приводит к особенно сильным штормовым сгонным ветрам вследствие более резких температурных контрастов в нижней тропосфере.

При сгонных ветрах, работающих над большей частью акватории Черного моря, устанавливается антициклоническая система течений с поперечной циркуляцией по часовой стрелке (если смотреть по течению). Все изолинии в данном случае наклоняются от берега к центру моря, принимая чашеобразный прогиб. Получается как бы оседание вод в центре общей антициклонической системы течений и подъем глубинных вод у берегов. При этом сгоны воды наблюдаются на огромных пространствах, нередко простираясь на сотни миль. На севере моря мы прослеживали сгоны, распространяющиеся одновременно вдоль всего побережья от Одессы до Батуми. Принимая во внимание огромные массы воды, которые участвуют в сгонно-нагонной циркуляции при круговых течениях, охватывающих все море, нетрудно убедиться, что эта циркуляция является если не основным, то одним из важных факторов вертикального обмена вод Черного моря.

Выводы

1. Нагоны и сгоны воды у приглубых берегов Черного моря обусловлены поперечной циркуляцией, возникающей в ветровом течении, господствующем в море.

2. В холодное время года, когда поверхностные воды хорошо перемешаны до глубины 50—60 м в открытой части моря и до 75—100 м в прибрежной, поперечная циркуляция в сгонном или нагонном потоке охватывает весь хорошо перемешанный слой. В прибрежных районах, где перемешивание доходит до дна, поперечная циркуляция охватывает всю толщу воды от поверхности до дна.

3. Летом, когда возникает второй слой скачка плотности, связанный с образованием резкого скачка температуры, поперечная циркуляция в сгонно-нагонном потоке осуществляется послойно. Одно кольцо поперечной циркуляции охватывает теплый хорошо перемешанный слой от поверхности до скачка температуры и второе — от скачка температуры до скачка солености.

4. Продолжительные нагонные ветры над Черным морем вызывают течения, направленные вдоль береговой черты слева направо (циклоническая система течений). Возникающая в этом потоке поперечная циркуляция, с вращением по часовой стрелке, перемещает воду по поверхности и верхней границе слоя (если море переслоено) от центра к берегу и по дну и нижней границе слоя от берега в море.

5. Продолжительные сгонные ветры вызывают течение вдоль берегов в обратном направлении, т. е. справа налево (антициклоническая система течений). Поперечная циркуляция при таком направлении основного потока будет перемещать воду по поверхности и верхней границе слоя от берега в море, а по дну и нижней границе слоя — с моря по направлению к берегу.

6. Поперечная циркуляция в ветровом течении переслоенных водных масс Черного моря характеризуется изменением величины и знака

нормальной составляющей течения при переходе от верхней границы слоя к нижней и изменением знака вертикальной составляющей течения на границах потока от центра к периферии. Величина поперечной составляющей течения на верхней границе слоя несколько больше, чем на нижней, поэтому при циклонической — нагонной системе течения приток вод в верхней части слоя больше оттока понизу, что приводит к утолщению прогретого поверхностного слоя по направлению к берегу; при антициклонической — сгонной системе течений, наоборот, отток по верхней границе слоя больше притока по нижней его границе, в результате теплая вода отгоняется от берега, и на поверхность поднимаются глубинные воды холодной прослойки.

7. Явление нагона у приглубых берегов Черного моря отмечается при сильном течении, порядка 40—60 см/сек, направленном вдоль берега слева направо, если смотреть на море с нормальной составляющей в поверхностном слое 3—9 см/сек. в сторону берега и в придонном слое 0,5—3 см/сек. в сторону моря. Нагоны характеризуются повышением уровня моря у берега, т. е. наклоном физической поверхности моря в сторону моря, измеряемым долями сантиметра на километр и понижением поверхности раздела по направлению к берегу, т. е. в сторону, противоположную наклону уровенной поверхности.

8. Явление сгона наблюдается при сильном течении вдоль берега справа налево, с нормальной составляющей в поверхностном слое в сторону моря, в придонном слое — в сторону берега и вертикальной составляющей течения в прибрежной полосе от дна к поверхности; в центрах антициклонических систем — от поверхности ко дну. Порядок величин тот же, что и при нагонах. Сгоны характеризуются понижением уровня у берега, т. е. наклоном физической поверхности моря в сторону берега, значительным наклоном поверхности раздела в противоположную сторону, т. е. в море и резким понижением температуры воды у берега.

9. Нормальная составляющая течения в поверхностном слое вблизи берега имеет обратное направление, в сторону берега при сгоне и в сторону моря при нагоне. В расстоянии 300—400 м от берега отмечается смена в направлении нормальных составляющих течения и дальше, с увеличением расстояния их направление соответствует явлению сгона или нагона. Зона смены нормальных составляющих течения в поверхностном слое при нагоне характеризуется сходимостью течений и сопровождается погружением вод, при сгонах — расходимостью и подъемом вод.

10. При смене относительно установившегося прибрежного течения на противоположное, оно постепенно поворачивается, меняясь вначале у самого берега, а затем уже мористее. Поворот течения в таких случаях осуществляется в сторону берега, при смене нагонного течения — по часовой стрелке, при смене сгонного — против. В обоих случаях нормальная составляющая течения в момент поворота направлена на берег.

11. В тех случаях, когда ветер меняется прежде чем устанавливается течение, поворот прибрежного неустановившегося течения происходит прежде в открытой части моря, осуществляется он по часовой стрелке при смене сгонного течения и против при смене нагонного, в обоих случаях с увеличением нормальной составляющей, направленной в море.

12. Характеризуя интенсивность поперечной циркуляции, нормальные и вертикальные составляющие течения являются не только показателями величины сгонов и нагонов воды у берега, но и показателем интенсивности вертикального обмена.

Таблица 1

Скорости течения по одновременным наблюдениям по малому и большому поплавкам (к большому шару подвешено полушарие в виде чашечных весов)

№№ п/п.	Д а т а	Время наблюдения	В е т е р в м/сек.	Расстояние в м	Т е ч е н и е				За 100% принято по- каз. малого
					большой		малый		
					Н град.	ск. см/сек.	Н град.	ск. см/сек.	
Течение направлено по ветру									
1	20/VII—1948	10-58	ЗЮЗ—4,9	220	66	3,9	205°	3,8	102
2	22/VII—1948	9-45	ЮЮ—2,5	290	290	19,4	292	20,1	97
3	»	11-21	ЮВ—2,2	440	289	22,1	288	18,5	119
4	»	11-41	ЮВ—2,2	662	293	23,3	292	19,3	121
5	31/VII—1948	9-41	СВ—3,0	290	235	18,8	230	17,4	108
Течение против ветра									
1	17/VII—1948	10-40	СВ—3,5	380	61	8,5	63	13,2	64
2	»	10-15	»	600	50	9,8	60	17,2	57
3	20/VII—1948	10-15	ЗЮЗ—3,4	430	138	2,3	215	6,6	35
4	»	10-39	ЗЮЗ—4,0	290	144	2,8	217	6,4	44
5	21/VII—1948	10-40	ЮЗ—3,0	197	274	13,3	262	16,5	81
6	»	10-20	»	275	281	11,7	266	16,5	71
7	»	10-07	»	480	275	15,5	265	19,7	79
8	»	9-40	ЮЗ—2,6	750	280	15,8	266	20,2	78
9	26/VII—1948	16-20	ЮЗ—2,0	222	257	31,7	249	36,7	85
10	»	16-00	СЗ—5,7	370	243	33,8	247	38,2	77
11	»	15-38	»	600	253	35,4	243	40,5	87
12	23/VII—1948	9-59	ЮЗ—2,0	219	310	5,7	285	6,0	95
		9-48	»	300	292	6,7	271	6,9	97
		9-29	»	418	290	8,1	266	7,7	105
		9-15	»	520	252	9,4	252	11,0	85
		9-01	»	705	267	11,7	267	12,3	95

Таблица 2

Подвес у большого шара в виде крестовины

Направление и скорость ветра в м/сек.	Т е ч е н и е				Отношение скоростей поплавков $\frac{I_6}{I_m}$
	малый поплавок		большой поплавок		
	направл. в град.	скорость в см/сек.	направл. в град.	скорость в см/сек.	
Течения, направленные по ветру					
BCB-4,9	270	37,0	270	32,7	0,88
BCB-4,9	263	30,3	260	28,4	0,94
BCB-3,9	248	22,7	247	22,0	0,97
CCB-0,6	261	45,0	259	43,3	0,96
B-2,5	248	20,0	252	20,0	1,00
B-2,6	249	16,1	249	16,1	1,00
CB-5,0	255	36,0	253	38,3	1,06
ЗСЗ-5,1	67	13,6	66	13,8	1,00
ЮЗ-5,0	71	24,4	74	26,6	1,09
ЮЮЗ-6,0	51	14,5	55	14,0	0,96
ЮЗ-5,4	59	22,4	59	21,2	0,95
ЮЗ-5,4	63	25,0	63	23,4	0,94
ЮЗ-6,3	68	28,7	63	27,7	0,93
CB-2,8	270	21,7	270	21,3	0,98
CB-2,8	262	21,0	257	21,0	1,00
CB-2,8	257	18,0	255	17,8	0,99
CB-3,3	253	17,0	258	16,7	0,98
Течения против ветра				Средн	0,98
ЮЗ-4,2	252	41,7	251	43,3	1,04
ЮЗ-4,2	255	32,7	249	34,3	1,05
ЮЗ-0,8	262	22,6	258	22,5	1,00
ЮЗ-0,8	253	18,8	247	18,0	0,96
ЮЗ-0,8	258	16,9	256	17,0	1,00
				Средн.	1,01

Скорости течения по одновременным наблюдениям по морской вертушке и малому поплавку

Таблица 3

Дата	Время	Ветер в м/сек.	Расстояние в метрах	Течение				Отношение скоростей $\frac{u_p}{u_v} \cdot 100$	Примечание
				вертушка		поплавков			
				Напр. град.	скор. см/сек	Напр. град.	скор. см/сек		
Течения, направленные по ветру									
7/VII-49	9-00	СВ-2,4	262	240	18	291	10	54	Период смены
12/VIII-»	9-26	В-7,3	300	260	18	260	24	132	
27/IX-»	12-10	ЮЗ-1,0	940	71	20	82	23	113	
28/IX-»	13-25	Ю-2,0	300	35	12	66	15	125	
»	12-50	Ю-1,0	450	300	4	69	8	200	
28/VI-50	15-02	СЗ-3,5	1150	167	12	140	9	74	
»	15-43	СЗ-5,0	580	133	6	149	9	132	
3/VII-»	9-10	СВ-4,6	300	244	33	240	38	115	
5/VII-»	11-10	З-7,0	1400	65	10	77	9	90	
»	12-20	З-8,0	800	137	8	74	12	151	
»	13-10	З-8,0	300	30	13	63	20	154	
10/VII-50	11-10	С-7,3	850	238	14	213	25	175	
»	9-40	С-10,1	300	203	21	201	14	69	
14/VII-50	10-53	ЗЮЗ-6,7	1100	107	22	70	30	138	
»	12-15	З-8,2	610	69	33	70	23	70	
»	13-05	З-7,0	300	45	14	60	22	157	
17/VII-50	12-45	З-2,4	610	212	41	249	36	88	
»	13-25	В-1,9	300	252	28	256	33	118	
19/VII-50	10-35	В-2,0	2600	250	32	255	40	125	
»	12-15	В-1,9	1300	238	34	257	32	96	
»	13-55	В-2,3	300	290	22	248	17	77	
21/VII-50	12-35	СВ-3,4	1000	284	33	279	31	94	
21/VII-50	13-22	СВ-2,8	300	267	12	271	8	67	
9/VIII-50	16-58	В-1,3	1200	83	30	86	24	80	
18/VIII-50	15-40	З-4,6	2500	130	13	118	14	108	
18/VIII-50	16-40	З-1,6	1150	90	10	84	10	100	
5/IX-50	14-19	В-3,9	1000	312	14	297	17	123	
»	15-10	В-3,4	270	250	8	253	9	112	
9/IX-50	14-52	З-8,1	290	40	22	68	26	120	
Течения против ветра									
4/VII-49	10-10	ЮЗ-1,5	314	240	39	242	32	83	
»	11-00	ЮЗ-2,4	650	235	39	245	35	90	
»	11-50	ЮЗ-4,5	1130	240	29	283	12	42	
7/VIII-49	9-46	СВ-6,5	600	20	28	5	8	29	
29/IX-49	10-00	З-2,7	1200	266	42	279	38	90	
14/VIII-50	13-35	ЮЗ-7,6	1150	245	35	246	18	52	
31/VIII-50	14-00	ЮЗ-1,8	3100	263	23	270	16	68	
»	15-15	Ю-1,7	1200	250	24	251	20	83	
»	16-20	ЮЮЗ-3,7	290	208	15	206	11	71	
Течения под углом к ветру									
28/IX-49	10-36	Ю-1,0	800	280	32	283	24	75	от ветра
30/VI-50	8-22	ЗСЗ-5,2	580	209	23	250	16	71	85° влево
»	9-30	—»—	300	205	17	256	13	76	76° вправо
12/VII-50	9-30	З-6,2	1100	39	12	24	5	42	»
14/VII-50	10-55	ЗЮЗ-6,7	1100	107	22	70	30	138	51° влево
10/VIII-50	16-20	СЗ-2,6	2600	100	12	41	10	85	67° вправо
»	17-28	З-2,6	1160	198	8	176	7	88	55° вправо
24/VIII-50	15-59	З-6,8	300	165	8	147	7	98	108° вправо
Течение при штиле									
2/VII-49	9-05	Штиль	270	307	24	312	28	117	
»	10-05	»	550	325	21	236	24	88	
»	12-20	»	1000	290	14	60	7	50	
17/VII-50	11-25	»	2600	254	29	250	33	113	
»	11-55	»	1120	235	26	245	33	127	

Таблица 4

Изменение скорости поверхностного течения и ее нормальной составляющей с удалением от берега при нагонных (В, ВСВ, СВ) ветрах

Дата	Ветер в м/сек.	Продолж. работы ветра в часах	Расстоя- ние от берега в метрах	Глу- бина в м	Течение		Нормальн. состав. течения в см/сек.	Нормальн. состав. в % от наблюд. скорости
					напр. в граду- сах	ск. см/сек.		
6/VIII— 48 г.	BCB— 4,4	3 часа	215	16	248	23	0	0
			260	20	263	30	+ 7	23
			630	46	270	37	+ 13	35
			1020	65	276	35	+ 16	46
20/VIII— 48 г.	BCB— 1—6		180	15	249	16	0	0
			390	23	258	17	+ 2	12
			500	42	253	19	+ 1	5
			750	58	262	23	+ 4	17
3/IX— 48 г.	CB— 2,8	9 час.	200	10	253	17	+ 1,5	9
			290	14	257	18	+ 3,0	17
			500	31	262	21	+ 5,2	25
			760	37	270	22	+ 8,2	37
29/V— 50 г.	BCB— 2—3	34 часа	260	12	246	36	— 1,2	3
			390	20	246	50	— 2	4
			650	47	254	51	+ 5	10
			2500	78	254	62	+ 6,2	10
3/VI— 50 г.	BCB— 7,3	24 часа	250	13	255	19	+ 2,5	13
			360	19	255	23	+ 3	13
			475	26	266	26	+ 8	31
			755	53	263	29	+ 8	28
9/VI— 50 г.	BCB— 5—4,5	10 час.	260	14	253	25	+ 2,2	9
			370	19	260	27	+ 5	18
			450	24	264	29	+ 8	28
			850	58	267	31	+ 10	32
29/VI— 50 г.	BCB—5 B—4,5	10 час.	270	13	252	36	+ 2,5	7
			400	21	271	39	+ 15,5	40
			500	30	274	39	+ 17,2	44
			600	43	278	38	+ 19,0	50
			900	60	279	38	+ 19,5	51
3/VII— 50 г.	CB— 1,5—4	17 час.	310	14	255	34	+ 4,2	12
			410	21	260	36	+ 7,5	21
			520	35	265	34	+ 10	29
			630	45	265	36	+ 10,6	30
			860	58	260	37	+ 8,0	22
6/VII— 50 г.	BCB— 7—8,5	3 часа	290	14	252	33	+ 2,2	7
			390	20	257	25	+ 4,0	16
			520	35	265	28	+ 8,5	30
			650	47	280	28	+ 15,0	53
			900	60	290	15	+ 10,0	67

Дата	Ветер в м/сек.	Продолж. работы ветра в часах	Расстоя- ние от берега в метрах	Глу- бина в м	Течение		Нормальн. состав. течения в см/сек.	Нормальн. состав. в % от наблюд. скорости
					Напр. в граду- сах	Ск. см/сек.		
15/VIII — 50 г.	BCB — 2,6	8 час.	280	14	250	16	+ 0,5	3
			290	20	255	15	+ 2,0	13
			500	30	263	16	+ 4,0	25
			610	45	270	16	+ 10,0	65
			850	58	273	16	+ 7,0	44
3/VIII — 48 г.	CB — 1,3	3 часа	180	10	248	7	0	0
			300	14	254	22	+ 2,0	9
			550	40	257	25	+ 3,0	12
			700	50	252	23	+ 2	9
17/VIII — 50 г.	B — 1,5—3,0	3 часа	280	14	160	26	+ 5,5	21
			410	21	262	29	+ 7,0	24
			540	39	261	32	+ 7,0	22
			700	50	258	34	+ 6,0	18
			960	61	256	40	+ 5,5	14
11/IX — 50 г.	B — 2,5	20 час.	300	14	262	21	+ 5,5	24
			620	45	261	23	+ 5,5	24
			1080	63	262	26	+ 6,0	23
11/IX — 50 г.	Ветер смен. с B на ЮЮЗ — 2,2	24 часа	280	14	248	19	0	0
			651	47	257	22	+ 3,5	16
			1020	63	264	26	+ 7,0	27
			1295	67	264	23	+ 6,5	28
			1970	75	260	28	+ 6,0	21
21/IX — 50 г.	BCB — 5,5	8 час.	325	15	249	20	+ 0,5	2
			680	49	272	21	+ 9,0	43
			1120	63	280	22	+ 12,0	54
			1750	74	280	22	+ 12,0	54
23/VIII — 48 г.	CB — 5,0	3 часа	245	13	239	44	— 8,0	18
			305	18	255	36	+ 3,0	8
			480	42	253	51	+ 3,0	6
			700	54	266	62	+ 18,0	29
5/VII — 48 г.	ЮЗ — 7,8	24 часа	195	15	72	17	— 1,0	6
			250	17	72	17	— 1,0	6
			460	41	75	15	— 2,0	13
			645	50	92	15	— 6,0	40
3/VII — 48 г.	ЗСЗ — 3 9,8	3—5 час.	225	16	72	31	— 1,0	3
			275	17	78	28	— 4,0	18
			510	41	90	20	— 6,0	30
			600	47	96	29	— 9,0	47
27/VIII — 48 г.	ЮЗ — 5,0	60 часов	235	16	51	14	+ 4,0	28
			400	27	71	24	— 4,0	17
			495	42	80	30	— 6,0	30
			680	52	84	62	— 16,0	25
			1020	62	94	64	— 26,0	40

Продолжение таблицы 4.

Дата	Ветер в м/сек.	Продолж. работы ветра в часах	Расстоя- ние от берега в метрах	Глу- бина в м	Течение		Нормальн. состав. течения в см/сек.	Нормальн. состав. в % от наблюд. скорости
					напр. в граду- сах	ск. см/сек.		
2/IX 48 г.	ЮЗ—5	5—6 час.	200	10	62	29	+ 3,0	10
			380	19	63	25	+ 2,0	8
			520	35	59	22	+ 3,5	16
			1000	62	50	14	+ 4,5	12
7/VI— 50 г. 8 час.	ЗЮЗ— 6,3—3,2	24 часа	264	12	70	24	— 1,0	4
			360	18	71	24	— 1,5	6
			450	23	70	23	— 1,0	4
			785	55	83	16	+ 4,5	28
15 ч. 10 м.	ЗЮЗ— 7,2—4,9	30 часов	300	14	78	28	— 5,0	18
			380	20	78	28	— 5,0	18
			480	27	78	29	— 5,2	18
			800	56	85	38	— 11,5	30
13/VI— 50 г. 15 ч. 00 м.	ЮЗ— 7,6	12 час.	270	13	64	47	+ 3,5	7
			380	20	68	50	0	0
			490	26	67	49	+ 1,0	2
			900	60	77	44	— 6,8	15
14/VI 50 г. 8 ч. 25 м.	ЮЗ— 4,4—5,3	24 часа	300	14	67	29	+ 0,8	3
			400	21	83	37	— 9,0	24
			500	30	78	40	— 7,0	18
			800	56	80	38	— 7,5	20
24/VI 50 г. 14 ч. 15 м.	З—6	7 часов	270	13	83	24	— 6,0	25
			400	21	83	26	— 6,5	25
			520	35	83	31	— 7,5	24
			650	47	90	31	— 11,0	35
			750	53	97	36	— 17,0	47
27/VI — 50 г.	З—2,2	4 часа	260	13	72	15	— 1,0	7
			370	19	85	16	— 4,5	28
			480	27	90	15	— 5,5	37
			620	44	96	16	— 7,0	44
			820	56	100	22	— 11,3	51
13/IX— 50 г. 9 ч. 10 м.	ЗЮЗ— 6,3	24 часа	310	15	64	35	+ 2,5	7
			620	44	66	32	+ 1,2	4
			1180	64	78	25	— 4,0	16
			2100	75	63	19	+ 2,0	10
11 час.	ЗЮЗ—8	26 часов	370	18	71	31	+ 1,5	5
			700	50	80	30	— 6,0	20
			1420	71	92	27	— 11,0	41
			2150	76	106	26	— 16,0	61
13 ч 22 м.	ЗЮЗ— 10,2	28 ч.	320	16	68	35	0	0
			790	55	72	34	— 2,0	6
			1240	64	69	27	— 1,0	4
			2000	75	65	11	+ 1,0	9

Продолжение таблицы 4.

Дата	Ветер в м/сек.	Продолж. работы ветра в часах	Расстоя- ние от берега в метрах	Глу- бина в м	Течение		Нормальн. состав. течения в см/сек.	Нормальн. состав. в % от наблюд. скорости
					напр. в граду- сах	ск. см/сек.		
16 ч. 25 м.	ЗЮЗ- 7,0	31 час.	320	15	71	37	— 1,8	5
			662	48	86	50	— 15,0	30
			1400	70	98	43	— 18,0	42
30/V 50 г. 16 ч. 30 м.	ЮЗ-З 4,3	9 час.	270	13	62	34	+ 3,5	10
			350	18	64	23	+ 2,0	9
			450	24	68	38	0	0
			600	43	77	31	— 5,0	16
5/VII— 50 г.	З-З,3	3 час.	300	14	63	14	+ 2,0	10
			800	60	74	12	— 1,0	8
			1400	70	77	9	— 3,0	33
14/VII 50 г.	З-7,0	48 час.	290	14	60	22	— 3,0	14
			620	48	70	23	— 1,0	4
			1160	64	70	30	— 2,0	7
25/VII 49 г.	ЗЮЗ- 5,9	24 час.	240	17	74	30	— 3,0	10
			500	18	78	33	— 6,0	18
			500	41	82	34	— 9,0	26
			600	47	90	34	— 13,0	38

Таблица 5.

Величина тангенциальной и нормальной составляющей течения по данным самописца за январь и февраль 1949 г.

Дата	Средний ветер по анемоинтегратору за периоды в м/сек.			Время наблюдения тече- ния час. мин.	Т е ч е н и е		Составляющие	
	21—7 час.	7—13 час.	13—21 час.		напр. в град.	ск. см/сек.	танг. см/сек.	норм. см/сек.
Январь 1949 г.								
3	CB—5,6	BBC—6,6	BCB—6,6	18-00	246	14,5	+14,5	—0,5
4	BCB—10,6	BCB—10,7	BCB—9,9	13-00	242	17,0	+17,0	—1,5
5	BCB—11,4	BCB—11,4	BCB—14,7	16-00	245	24,0	+24,0	—1,0
8	CCB—1,0	CB—3,3	CB—8,9	22-00	242	20,5	+20,5	—2,1
12	CB—5,3	CB—6,3	CB—4,5	6-00	235	7,0	+6,5	—1,5
»	»	»	»	7-00	241	15,0	+14,5	—1,5
»	»	»	»	8-35	240	17,5	+17,0	—2,0
»	»	»	»	11-20	247	20,0	+20,0	0
»	»	»	»	13-00	249	15,0	+14,5	+1,0
»	»	»	»	21-00	270	9,5	+8,5	+4,0
13	CB—5,2	BCB—9,3	BCB—12,7	7-00	—	0	0	0
»	»	»	»	13-00	242	24,0	+23,5	—2,0
»	»	»	»	21-00	246	23,0	+22,5	—0,5
14	BCB—13,3	BCB—13,9	BCB—9,1	7-00	247	22,5	+22,5	—0
»	»	»	»	13-00	242	20,5	+22,0	—1,5
»	»	»	»	21-00	246	23,0	+22,5	—0,5
18	CCB—8,7	CB—3,4	ЮЗ—2,2	13-00	240	10,5	+10,0	+1,0
»	»	»	»	21-00	314	4,0	+2,0	+3,5
19	ЮЗ—5,4	ЮЗ—7,0	ЮЗ—4,2	3-30	—	0	0	0
»	»	»	»	7-00	57	7,5	—7,0	+2,0
»	»	»	»	13-00	55	8,0	—7,5	+2,0
»	»	»	»	21-00	55	8,0	—7,5	+2,0
20	ЮЗ—4,2	ЗЮЗ—3,9	ЗЮЗ—4,9	7-00	90	7,5	—7,0	—2,5
»	»	»	»	13-00	—	0	0	0
»	»	»	»	21-00	90	6,0	—5,5	—2,0
27	CB—6,4	BCB—10,1	BCB—6,7	15-30	241	12,0	—11,5	—1,0
»	»	»	»	20-00	236	18,0	+17,5	—3,0
»	»	»	»	21-00	236	13,0	+12,8	—2,0

Таблица 6.

Уменьшения скорости течения на третьи сутки работы ветра
без ослабления силы ветра

Дата	Осредненный ветер по ленте анемомонитратора в м/сек.			Ветер в момент наблюден.		Течение	
	21—7	7—13	13—21	вр.	напр. ск.	н. град.	ск. см/сек.
7/IV-48	BCB—3,5	BCB—7,9	BCB—7,4	—	—	—	—
8/IV-48	BCB—5,1	BCB—5,4	BCB—2,0	14.22	BCB—5,3	239	23,5
9/IV-48	BCB—4,9	BCB—9,3	BCB—12,0	8.50	BCB—6,4	249	16,6
13/XII-48	CB—3,3	BCB—6,6	CB—13,8	—	—	—	—
14/XII-48	BCB—17,3	BCB—17,4	CB—12,8	10.20	BCB—9,7	244	81,7
»	»	»	»	13.45	BCB—15,0	—	—
»	»	»	»	16.12	BCB—9,3	237	91,5
15/XII-48	BCB—10,5	BCB—15,1	CB—10,4	9.17	BCB—12,9	248	71,0
»	»	»	»	11.00	BCB—10,4	243	65,5
»	»	»	»	15.48	BCB—7,8	236	52,0
16/XII-48	CB—9,6	BCB—17,5	BCB—18,8	8.55	CB—12,4	240	37,6
»	»	»	»	15.50	BCB—14,0	240	37,1
16/X-48	CB—4,0	CB—9,1	CB—7,4	8.46	CB—5,7	242	57,7
17/X-48	CCB—5,8	CB—10,6	CB—10,5	9.27	—	—	—
18/X-48	CB—6,7	CB—9,0	CB—6,5	9.06	CB—6,9	244	26,6
19/X-48	CB—3,8	CB—6,9	CB—6,8	8.15 9.25	CB—7,1 CB—8,1	268	17,7

Таблица 7.

Затухание и смена течения на обратное, на непродолжительное время при устойчивом и продолжительном ветре

Д а т а	Осредненный ветер по ленте анемомониторатора в м/сек.			Ветер в момент наблюдения		Расстоя- ние в м	Т е ч е н и е	
	21-7	7-13	13-21	время	ск. м/сек.		напр. град.	ск. см/сек.
26/V-1950	ЗСЗ—2,6	BCB—7,8	BCB—2,8	11.35	BCB—7,7	330	250	58
»	»	»	»	14.30	BCB—1,6	250	242	36
27/V-1950	CCB—2,2	BCB—5,0	BCB—3,3	9.40	BCB—4,9	250	333	2
»	»	»	»	»	»	300	73	7
»	»	»	»	»	»	500	125	6
»	»	»	»	16.27	BCB—2,4	250	250	28
13/VII-1950	C—2,5	ЮЗ—5,5	ЮЗ—1,8	10.50	ЮЗ—4,1	270	—	2
»	»	»	»	14.20	ЮЗ—7,1	186	60	38
»	»	»	»	16.00	ЮЗ—3,8	180	66	42
»	»	»	»	17.00	ЮЗ—2,5	300	90	42
14/VII-1950	CCB—2,2	ЮЗ—5,5	ЮЗ—5,3	11.10	З—6,7	1160	70	30
»	»	»	»	12.20	З—8,2	615	70	23
»	»	»	»	13.10	З—7,0	285	60	22
15/VII-1950	ЮЗ—3,7	ЮЗ—5,5	ЮЗ—1,0	9.50	ЗЮЗ—4,3	260	260	7
»	»	»	»	»	»	340	260	9
»	»	»	»	»	»	440	260	11
»	»	»	»	»	»	545	260	16
»	»	»	»	»	»	882	260	21
»	»	»	»	14.05	ЗЮЗ—5,0	268	68	30
»	»	»	»	»	»	370	68	26
»	»	»	»	»	»	470	68	26
»	»	»	»	»	»	593	65	26
»	»	»	»	»	»	810	68	18
18/IX-1949	BCB—5,0	BCB—7,1	BCB—10,0	—	—	—	—	—
19/IX-1949	BCB—7,1	BCB—10,7	BCB—10,0	9.42	BCB—10,9	230	242	85
»	»	»	»	16.20	BCB—13,4	300	243	85
20/IX-1949	BCB—2,3	BCB—7,8	BCB—4,8	16.20	BCB—8,8	270	63	54

ЛИТЕРАТУРА

- Багров Н. А., 1946. Развитие ветрового нагона в замкнутом море. Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., т. X, № 6.
- Белинский Н. А., 1950. Морские гидрометеорологические информации и прогнозы.
- Водяницкий В. А., 1948. Водообмен и формирование солености Черного моря. Тр. Севастопольск. биол. ст., т. VI.
- Егорова В. А., 1957. Гидрохимические исследования в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря. Тр. ин-та океанолог., т. XXI.
- Иванов Р. Н. и Богданова А. К., 1953. К вопросу о морских прибрежных течениях. Тр. Морского гидрофиз. ин-та АН СССР, в. 3.
- Иванов Р. Н., 1953. Новые способы измерения прибрежных течений. Тр. Морского гидрофиз. ин-та АН СССР, в. 3.
- Иванов Р. Н., 1953. Стационарный самописец придонных течений. Тр. Морского гидрофиз. ин-та АН СССР, в. 3.
- Иванов Р. Н., 1957. Влияние берега на направление ветрового поверхностного течения. Тр. Морского гидрофиз. ин-та АН СССР, т. XI.
- Ислямов Ис., 1900. Течение у Ливанского плавучего маяка. Записки по гидрограф., в. XXI.
- Клосовский А., 1890. Колебание уровня и температуры в береговой полосе Черного и Азовского морей. Записки по гидрограф., вып. 2.
- Книпович Н. М., 1933. Гидрологические исследования в Черном море. Тр. Азовско-Черноморской научно-промысловой экспедиции, в. 10.
- Киткин П. А., 1947. Ветровые колебания уровня мелководного замкнутого бассейна. Тр. ГОИН(а), в. 2/14.
- Лейбензон Л. С., 1940. К вопросу о циркуляции возбуждаемой ветром в замкнутом бассейне. Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., № 1.
- Малинин Д. М., 1926. Зависимость течения от ветра вдоль западного побережья США. Зап. по гидрограф., т. LI.
- Михалевский А. И., 1929. Течение у Средне-Жемчужного плавучего маяка на Каспийском море. Зап. по гидрограф., т. LVIII.
- Никитин В. и Скворцов Е., 1926. Непериодические изменения гидрологических элементов и состава планктона у южных берегов Крыма. Зап. Крымск. общ. естествоиспыт., т. IX.
- Ржеплинский Г. В., 1950. О сулоях у юго-восточного побережья Крыма. Метеоролог. и гидролог., № 2.
- Струйский Н. Н., 1930. Связь между действующим ветром и поверхностным течением. Зап. по гидрографии, т. 63.
- Штокман В. Б., 1941. Ветровой нагон и горизонтальная циркуляция в замкнутом море небольшой глубины. Изв. АН СССР, серия географ. и геофиз., № 1.
- Штокман В. Б., 1951. О некоторых укоренившихся заблуждениях в физической океанографии. Природа, № 10.
- Шулейкин В. В., 1951. Физика моря.
- Экман В., 1915. К теории морских течений. Перевод Пиотровского. Зап. по гидрограф., т. XXXIX, в. 5.