

А. К. БОГДАНОВА

**РОЛЬ СГОННО-НАГОННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ВОДООБМЕНЕ
ЧЕРЕЗ БОСФОР**

В предшествующих статьях (Богданова, 1959, 1960) были рассмотрены многолетние колебания гидрологических элементов Черного моря и влияние изменчивости основных составляющих водного и солевого баланса на вертикальное перемешивание его вод. Была отмечена огромная роль водообмена через Босфор в формировании гидрологического режима Черного моря и дана общая количественная характеристика этого обмена. Приведены фактические материалы, подтверждающие сохранение резкой границы между средиземноморской водой, растекающейся тонким слоем по дну, и черноморской, лежащей над ней. Последние указывают на весьма слабое смешение этих вод и дают основание предполагать, что они достигают больших глубин.

В настоящей статье освещается механизм водообмена через Босфор и зависимость его от сгонно-нагонных ветров и течений. Сгонно-нагонная циркуляция в прибосфорском районе Черного моря вызывает быстрые изменения в распределении температуры и солености вдоль Босфора и в значительной степени определяет не только количественные характеристики водообмена, но и обмена солями и теплом.

В работах Макарова (1885) и Мерца (1917—1918) указывалось на зависимость верхнего и нижнего течений в Босфоре от колебаний уровня и ветра. Меллер (1928) по материалам Мерца строила кривые связи расходов верхнего и нижнего течений с разностью атмосферного давления в Зунгулдаке (Черное море) и Смирне (Эгейское море) и с силой ветра в указанных пунктах.

В последующие годы были опубликованы работы по Босфору Иллиота и Ильгаза (Illyott Ph. and Ilgaz O., 1946) и Пекташа (Hüsyin Pektaş, 1953, 1954, 1955, 1956). Иллиот и Ильгаз пришли к ошибочному выводу об отсутствии водообмена через Босфор. По их мнению, существует только односторонний отток черноморских вод в Мраморное море, а мраморноморские воды в Черное море не поступают в силу наличия порога на глубине 50 м при выходе в Черное море. Ошибочность вывода Иллиота и Ильгаза доказана рядом исследователей: Водяницким (1948), Шляминым (1951), Лебедевым (1933), Бруевичем (1953), Пекташем (1953, 1954, 1955) и др.

В работах Пекташа (1953, 1954 гг.) рассматривается зависимость водообмена от сезонных колебаний разностей уровней: Черное—Эгейское моря, Черное — Средиземное. Пекташ выделяет два периода: первый с конца февраля до середины августа с максимальным превышением среднемесячного уровня Черного моря над средиземноморским, и второй — с конца августа до начала марта с наименьшей раз-

ностью уровней. Первый период характеризуется сильными поверхностными и слабыми нижнебосфорскими течениями. Причем с марта до конца июня, когда отмечается максимальное превышение уровня Черного моря над Средиземным, нижнебосфорское течение не достигает Черного моря. Ошибочные выводы Иллиота и Ильгаза Пекташ тем и объясняет, что их наблюдения проводились именно в этот период. Однако с таким выводом Пекташа нельзя согласиться. В литературе приводятся случаи, когда в период максимальных разностей среднемесячных уровней в Черном море прослеживались средиземноморские воды высокой солености. Так, в марте 1935 г. на расстоянии нескольких миль от Босфора, на глубине 60 м встречалась мраморноморская вода соленостью 36—37‰ и температурой 12,°4, в то время как окружающая вода имела температуру 4,0—4,5 (Якубова, 1948). В мае 1958 г. наблюдалась средиземноморская вода на расстоянии 5 миль от входа в Босфор на глубине 65—69 м с температурой 9,5—9,4 и соленостью 24,78—24,92‰ (Рождественский, 1958). И, наконец, материалы съемок прибосфорского района Черного моря, выполненных Севастопольской биологической станцией в разные сезоны года (31.VII.1958 г., 6—9.VI.1960 г., 15.X.1960 г. и 21—22.II.1961 г.), опровергают выводы не только Иллиота и Ильгаза, но и Пекташа.

Прежде всего было установлено, что в период максимального превышения среднемесячного уровня Черного моря над Средиземным (с конца февраля до середины августа) средиземноморские воды поступают в Черное море. Пекташ же считал, что летом при небольшой толщине слоя нижнебосфорского течения средиземноморские воды доходят лишь до порога, при подъеме по нему они увлекаются поверхностным течением обратно в Мраморное море, т. е. происходит то, о чем говорил Иллиот и Ильгаз.

Пекташ не учитывал влияния сгонно-нагонного ветра и течения, которые и в период наибольшей разности среднемесячного уровня (Черное—Эгейское море) приводят к временному изменению в соотношении их уровней и сопровождаются интенсивным поступлением средиземноморских вод в Черное море.

Наблюдения Севастопольской биологической станции выполнялись за пределами порога и показали, что средиземноморские воды поступают в Черное море во все сезоны года (за исключением периодов с неблагоприятными ветрами) и опускаются на значительные глубины моря.

Период с конца августа до начала марта характеризуется ослаблением верхнебосфорского течения и усилением нижнего. В работе Пекташа отмечается, что в ноябре—декабре, когда уровень Черного моря является сравнительно низким, под действием легкого одно-двухдневного южного ветра все живое сечение Босфора заполняется мраморноморскими водами. При сильных ветрах южных румбов поверхностная соленость в районе Кандили (в средней части Босфора), по данным Пекташа, достигает 27—29‰. Для периода наименьшей разности уровней Черного и Эгейского морей сильные южные ветры могут приостановить верхнебосфорское течение. В этих случаях по всему сечению Босфора течения направлены в сторону Черного моря, но повторяемость их небольшая. По данным Пекташа (1953), за период с марта 1952 по март 1953 гг. одностороннее течение в сторону Черного моря наблюдалось в течение 16 дней, что составляет 4,5%, причем все случаи приходились на период низкого стояния среднемесячного уровня Черного моря (с 26.VIII.1952 г. по 11.II.1953 г.).

Поскольку уровень Черного моря в течение всего года остается выше, чем в Средиземном море, то, естественно, повторяемость одностороннего течения, направленного в сторону Мраморного моря, большая, чем в сторону Черного моря. Однако в зависимости от ветрового режима и сгонно-нагонной циркуляции в прибосфорских участках обоих морей даже в период максимальной разности среднемесячных уровней Черное—Эгейское море возможны нижнебосфорские течения, которые вносят в Черное море средиземноморские воды. При ярко выраженном сгоне в юго-западном районе Черного моря расходы нижнебосфорского течения могут достигать значительных величин. И, наоборот, если в период наибольшей разности среднемесячных уровней в прибосфорском районе Черного моря будет наблюдаться нагонная система ветров, а со стороны Мраморного моря — сгонная, то по всему сечению Босфора может установиться течение из Черного моря в Мраморное.

Наблюдения Мерца (в конце мая и начале июня 1918 г.) подтверждают наличие мощных нижнебосфорских течений в период наибольшей разности среднемесячных уровней Черное—Средиземное море (расходы нижнебосфорских течений колебались от 4,2 до 10,7 тысяч $\text{м}^3/\text{сек.}$).

В своих работах Пекташ (1955, 1956) рассматривает вопрос о влиянии средиземноморских вод на гидрологический режим Черного моря. В них он пытается показать, что средиземноморские воды, вливаясь в Черное море, не поступают в его глубины, а растекаются по промежуточному слою (150—200 м), где в силу этого создается скачок солености, полностью изолирующий глубинные воды от смешения с поверхностными.

Обширные материалы по гидрологии, гидрохимии, накопленные по Черному морю советскими исследователями, опровергают это устаревшее представление о гидрологическом режиме Черного моря. Работы Пекташа подробно рассматриваются Водяницким (1958), Богдановой (1959).

Конкретные наблюдения, опубликованные Пекташем, относятся к району прибосфорского порога у северного входа в пролив. Наблюдения выполнялись не по разрезу, а на отдельных вертикалях один-два раза в месяц. Эти данные могут быть использованы лишь для качественной характеристики обмена. Все количественные расчеты, выполненные Водяницким (1948), Бруевичем (1953), Богдановой (1959), основываются на наблюдениях Макарова и Мерца, так как никаких других наблюдений, которые были бы пригодны для этой цели, не имеется. Поэтому для выяснения роли сгонно-нагонной циркуляции в водообмене через Босфор пришлось вновь пересмотреть данные Макарова и Мерца и по возможности использовать разрозненные материалы по солености и температуре в прибосфорском районе Черного моря, а также наблюдения над уровнем и ветром советских гидрометеорологических станций. При этом были выявлены некоторые особенности водообмена в связи со сгонно-нагонной циркуляцией в прибосфорском районе Черного моря.

Еще Макаров (1885) указал на две основные причины водообмена через Босфор: 1) постоянное превышение среднемесячного уровня Черного моря над Средиземным, которое определяет сток черноморских вод верхнебосфорским течением и 2) разность плотностей вод этих бассейнов, обуславливающая постоянный приток средиземномор-

ских вод в Черное море. Им же было рассчитано среднее превышение уровня Черного моря над Мраморным, которое выражается 43 см.

Как известно, наибольшее превышение среднемесячного уровня Черного моря над Средиземным наблюдается с марта по июль. В этот период происходит усиление верхнебосфорского течения и затухание нижнебосфорского. С августа по февраль разность среднемесячных уровней Черное—Средиземное море уменьшается, соответственно следует ожидать ослабления верхнебосфорского течения и усиления нижнего. Для характеристики годового хода разности среднемесячных уровней данных морей приведен рис. 1, где по Средиземному и Эгейскому морю использованы данные Пекташа, по Черному — данные Севастопольской обсерватории Гидрометеослужбы УССР.

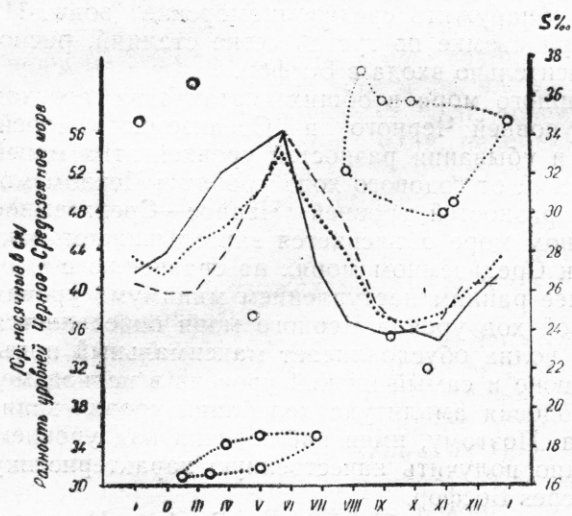


Рис. 1. Годовой ход разности уровней Черное — Средиземное море (Ялта — Анталья «—»), Черное — Эгейское (Ялта — Измир «...»), уровня Черного моря (Ялта «- - -») и солёности воды в прибосфорском районе Черного моря (○...○).

Амплитуда изменения разности среднемесячных уровней Черного и Средиземного морей составляет 22 см с максимумом в июне и минимумом в сентябре—ноябре. Приняв за «0» поста по Ялте отметку 43 см (среднее превышение уровня Черного моря над Мраморным по Макарову), были получены значения максимального (57 см) и минимального (35 см) среднемесячного превышения уровня Черного моря над Средиземным. Прекращение нижнебосфорского течения возможно только в том случае, когда уровень Черного моря будет выше Мраморного на 83 см. Но так как при исследованиях в Босфоре Макаровым ни разу не наблюдалось отсутствие нижнебосфорского течения, то он высказывает предположение, что такое превышение, вероятно, встречается весьма редко.

Четко выраженный годовой ход превышения уровня Черного моря над Средиземным указывает на наличие годового хода водообмена через Босфор. Однако до настоящего времени не имеется не только данных по годовому ходу расходов верхне- и нижнебосфорского течений, но нет и абсолютных отметок уровня по Мраморному и Эгейскому морям, поэтому при рассмотрении величины превышений уровня Черного моря над Средиземным использовались расчетные данные Макарова.

Для качественной характеристики связи годового хода разности уровня с интенсивностью нижебосфорского течения на график разности уровней Черное—Средиземное море нанесена соленость придонного слоя воды в прибосфорском районе по данным Пекташа (1954), Якубовой (1948), Рождественского (1958) и наблюдениям Севастопольской биологической станции. В период наименьшей разности уровней Черное—Средиземное море нижебосфорское течение усиливается, и таким образом, в прибосфорском районе Черного моря легче прослеживаются средиземноморские воды. И, наоборот, в период наибольшего превышения уровня Черного моря нижебосфорское течение ослабевает, поэтому средиземноморские воды в прибосфорском районе встречаются реже. Поскольку направление движения средиземноморских вод при выходе из Босфора непостоянно и зависит от ветра и течения в прибосфорском районе Черного моря, наблюдения на одной точке не всегда позволяют обнаружить средиземноморские воды. Их удастся проследить лишь при съемке по густой сетке станций, расположенных симметрично относительно входа в Босфор.

Годовой ход уровня Черного моря в общих чертах отражает ход разностей среднемесячных уровней Черного и Средиземного морей. Однако начало нарастания и убывания разностей уровней этих морей запаздывает примерно на месяц от годового хода уровня в Черном море. Такое смещение кривой разностей уровней Черное—Средиземное море от хода уровня в Черном море объясняется запаздыванием максимума уровня в Эгейском и Средиземном морях по сравнению с Черным морем и, наоборот, более ранним наступлением минимума уровня в Средиземном море. Годовой ход уровня Черного моря определяется речным стоком. Паводочная волна обуславливает максимальный подъем уровня Черного моря в июне и самый низкий уровень в период межен — октябре, ноябре. Годовая амплитуда колебаний уровня зависит от объема речного стока. Поэтому, имея наблюдения над уровнем и материковым стоком, можно получить качественную характеристику водного и солевого обмена через Босфор.

Кроме годовой периодичности водообмена через Босфор, Мерц отмечает еще суточную периодичность, связанную с приливо-отливными колебаниями уровня и течений. В зависимости от фазы прилива расходы верхнего и нижнего течений в Босфоре, по Мерцу, изменяются на величину ± 2000 м³/сек. Крайние значения отклонений расходов наблюдались им в 5 и 10,5 часа по Гринвическому времени. Приливо-отливные колебания водообмена через пролив по существу не изменяют суточной величины расхода, но оказывают большое влияние на динамику течений.

Наибольшую роль в водообмене имеют непериодические сгоны и нагоны воды на концах пролива, изменяющие не только соотношения расходов верхнего и нижнего течений, но и всю физико-химическую характеристику вод, втекающих через пролив в Черное море и вытекающих из него. Годовой ход водообмена через Босфор, обусловленный сезонным колебанием уровня, значительно нарушается сгонами и нагонами. Сгонно-нагонная циркуляция в прибосфорском районе Черного моря вызывает не только колебания уровня, но значительно перераспределяет водные массы по вертикали, что приводит к непериодическому изменению водообмена, обмена солями и теплом через Босфор.

Нагонные ветры создают циклоническую систему течений с поперечной составляющей, перемещающей поверхностные воды по направ-

лению к берегу. В этом случае распресненные воды северо-западного района моря, прижимаясь к западному берегу, движутся вдоль него на юг и, достигая прибосфорского района, часть их устремляется в пролив. При этом, наряду с высокой температурой вытекающих вод, поскольку нагон теплых вод по направлению к берегу исключает вовлечение вод холодной прослойки, верхнебосфорское течение характеризуется пониженной соленостью. Воды нижнебосфорского течения в период нагона соприкасаются и перемешиваются с теплыми водами верхнебосфорского течения, поэтому в глубины Черного моря поступают менее соленые и более теплые воды.

В период сгонных ветров и течений, напротив, поверхностные воды перемещаются по направлению к центральным районам моря, а у берега поднимаются с глубин более соленые и холодные воды. В летнее время при сгоне наблюдается уменьшение толщины теплого слоя по направлению к берегу. Поэтому в верхнебосфорское течение вовлекаются и воды холодной прослойки. Таким образом, часть холодной воды из промежуточного слоя Черного моря выносится верхнебосфорским течением в Мраморное море, часть же ее, в результате смешения с нижнебосфорскими водами, возвращается обратно и поступает в большие глубины Черного моря, перемещая таким путем какое-то количество холодных вод из промежуточных слоев в глубинные. Поэтому большая повторяемость сгонных ветров в юго-западном районе Черного моря сказывается на некотором потеплении промежуточных вод и охлаждении глубинных. И, наоборот, увеличение повторяемости нагонных ветров сопровождается охлаждением промежуточных вод и потеплением глубинных.

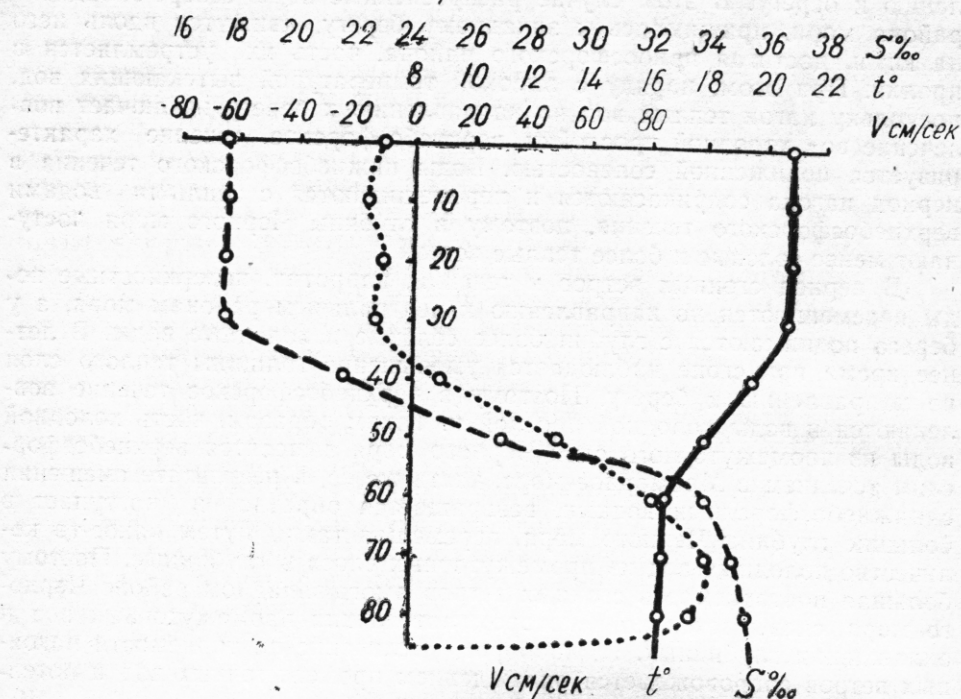
Для прибосфорского района Черного моря ветры западной половины горизонта (от СЗ до ЮЗ) вызывают нагонную систему течений и сопровождаются повышением уровня и утолщением прогретого поверхностного слоя воды по направлению к берегу. Поэтому при указанных ветрах в летнее время из Черного моря через Босфор выносятся только теплые поверхностные воды. Следует иметь в виду, что расходы верхнего и нижнего течений при северных и северо-западных ветрах совершенно иные, чем при западных и юго-западных ветрах, несмотря на то, что и те и другие создают в юго-западном районе Черного моря нагонную систему течений. Первые, совпадающие по направлению с верхнебосфорским течением, значительно усиливают его, а вторые (ЮЗ и З), наоборот, имеют составляющую скорости ветра, направленную против течения, и ослабляют последнее. В соответствии с изменением расхода верхнебосфорского течения меняется расход и нижнего течения, только в обратном направлении. Увеличение верхнего течения сопровождается уменьшением нижнего и наоборот.

Сгонными ветрами для юго-западного района Черного моря являются южные, юго-восточные, восточные и северо-восточные ветры. Они вызывают сгонную циркуляцию в прибосфорском районе, сопровождающуюся понижением уровня и (в летний период) уменьшением толщины прогретого слоя по направлению к берегу. В этом случае глубинные воды поднимаются ближе к поверхности и верхнебосфорским течением выносятся не только поверхностные воды, но и воды холодной прослойки. Ветры северо-восточных и восточных направлений способствуют усилению верхнебосфорского течения, а юго-восточные и южные ослабляют его.

На рис. 2 дано вертикальное распределение температуры, соле-

Ст. 35, 30. IX. 1917, $h=80$ м, втр SW-4, влн-2, в-2 км от Черного моря

а/ при нагоне



Ст. 14, 25. IX. 1917, $h=69$ м, втр NO-4-5, в-4,4 км от Черного моря

б/ при сгоне

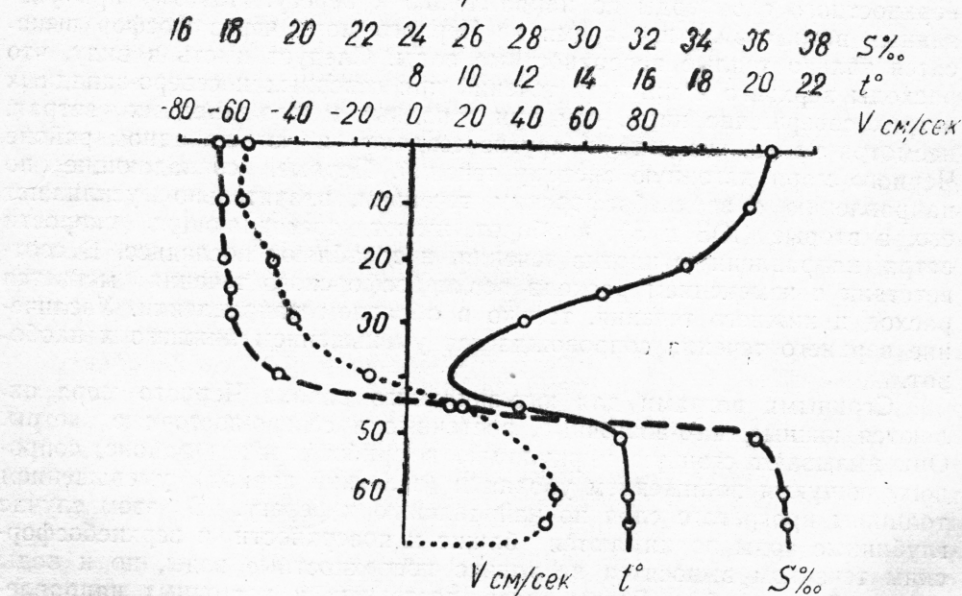


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры (t°), солёности ($S_{\text{‰}}$) и скорости течения (v см/сек) при нагоне — «а» и при сгоне — «б» в приобсфорском районе Черного моря.

ности и скорости течения на станциях, расположенных в 2 и 4,5 км от северного входа, при нагонном юго-западном и сгонном северо-восточном ветре. На рис. 3 представлен температурный разрез вдоль Босфора при сгоне в юго-западной части Черного моря, для чего использованы наблюдения датского судна «Thor» 10.VIII.1910 г. на трех станциях: при входе в Босфор, в средней его части и у выхода в Мраморное море (Schmidt J., 1912).

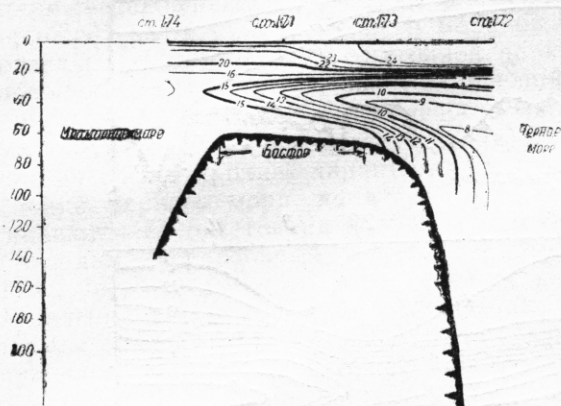


Рис. 3. Температурный разрез вдоль Босфора при сгоне в прибосфорском районе Черного моря (по наблюдениям датской экспедиции «Тор» 10.VIII.1910 г.).

По наблюдениям Мерца, в сентябре и начале октября 1917 г. воды черноморской холодной прослойки прослеживались в проливе на расстоянии 20 км от северного входа. Зубов в работе о проливах Мирового океана (1956) приводит данные Мерца по вертикальному распределению температуры и солёности на станции, расположенной в 8,6 км от Черного моря. Он отмечает, что холодный промежуточный слой (остаток зимнего режима в прилегающем к Босфору районе Черного моря) прослеживался в мае 1918 г. вплоть до самого выхода в Мраморное море. Однако Зубов не анализировал условий, при которых холодные воды промежуточного слоя Черного моря наблюдаются в Босфоре, и при каких условиях верхнебосфорское течение выносит только теплые воды.

Холодные воды обычно наблюдаются в Босфоре в периоды устойчивых восточных и северо-восточных ветров, когда в прибосфорском районе Черного моря создается сгонная циркуляция. Это легко можно проследить по многочисленным материалам Макарова и Мерца, собранным в теплое время года. Анализируя данные Мерца, Меллер (1928), однако, построила разрезы температуры и солёности вдоль Босфора без учета направления и силы ветра в период наблюдения на разных станциях.

Известно, что течения очень быстро меняются с изменением ветра. В прибрежной полосе практически они устанавливаются примерно через 6 часов (Иванов, Богданова, 1953). Смена нагонного течения сгонным приводит к быстрому перераспределению водных масс, хорошо прослеживаемому по изменению распределения температуры и солёности на разрезе, нормальном к берегу (Богданова, 1959). При малой протяженности пролива (примерно 17 миль) и относительно больших скоростях течений в нем (30—50 см/сек.) через сутки после смены ветра и течения в прибосфорском районе распределение температуры

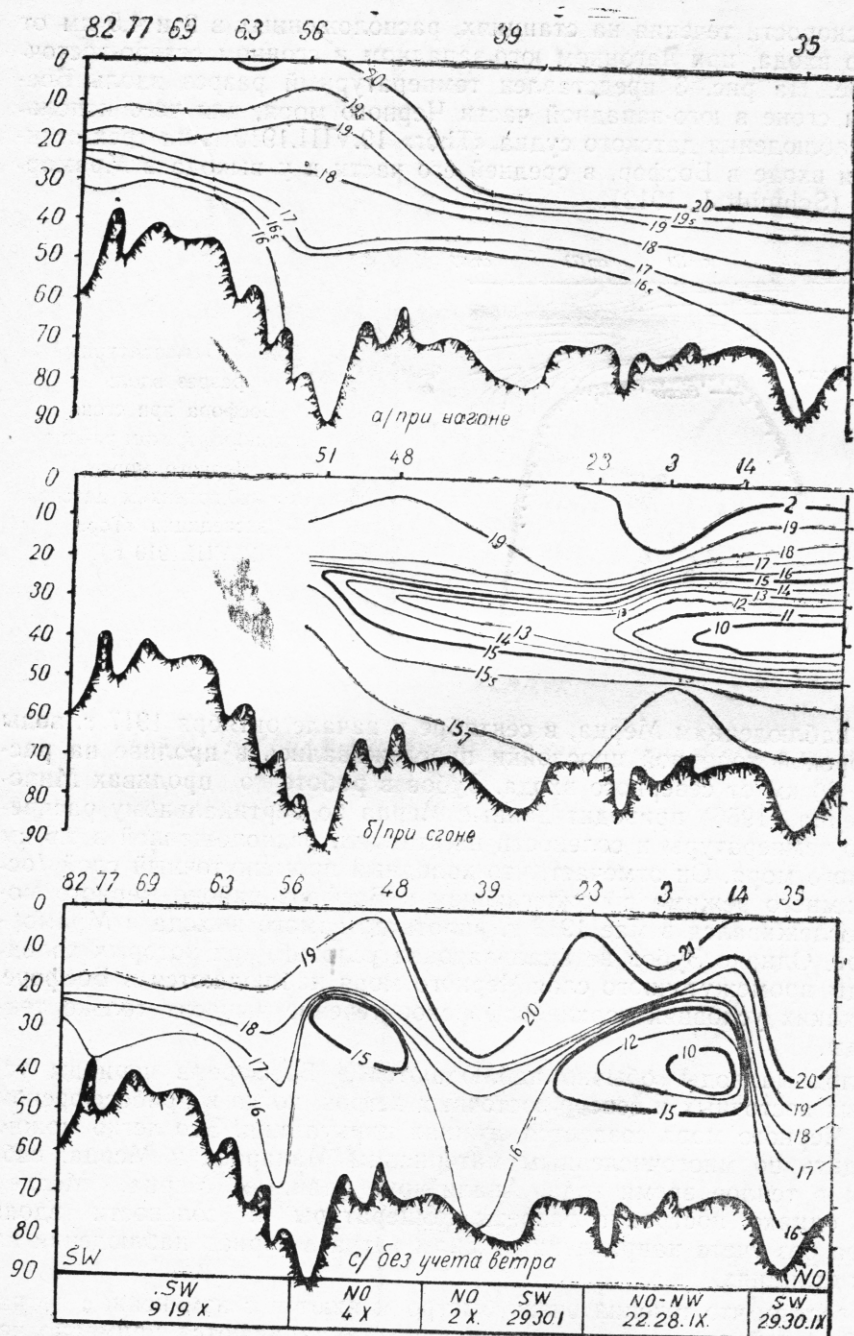


Рис. 4. Продольное распределение температуры в Босфоре: а) при нагоне, б) при сгоне (по наблюдениям Мерца А., с учетом ветра) и в) без учета ветра (рис. заимствован из работы Л. Меллер).

и солености в проливе должно существенно измениться. Поэтому нельзя на один разрез наносить наблюдения, выполненные при разных ветрах. По этой причине вопрос о влиянии сгонного или нагонного явления в прибосфорском районе Черного моря на распределение температуры и солености в проливе остался нерешенным и работами Меллер (1928).

По тем же материалам Мерца мы построили продольные разрезы распределения температуры и солености в проливе отдельно по станциям, выполненным при ветрах юго-западных направлений, когда в прибосфорском районе Черного моря была нагонная циркуляция, и отдельно — для случаев со сгонной циркуляцией, т. е. при ветрах северо-восточных направлений. Как и следовало ожидать, картина распределения температуры и солености вдоль пролива существенно изменилась. На первом разрезе (рис. 4а) распределение гидрологических показателей в проливе характеризуется отсутствием вод холодной прослойки Черного моря, на втором (рис. 4в) последние четко прослеживаются на расстоянии до 20 км от входа в пролив. Для сравнения приводим продольный разрез температуры из работы Меллер (рис. 4с), построенный ею по всем станциям вне зависимости от направления ветра в период наблюдений. Сложная конфигурация изотерм с замкнутыми ядрами холодной воды является результатом допущенной Меллер ошибки при построении графиков и не отражает фактического распределения температуры в проливе. Вероятно, и сам автор обратил на это внимание, поскольку под разрезом указал периоды наблюдений с преобладающим юго-западным или северо-восточным ветром. Характеризуя распределение солености по оси Босфора, Зубов приводит эти же рисунки Меллер, и, следовательно, также не дает истинной картины распределения.

В отличие от продольных, поперечные разрезы распределения температуры и солености, приведенные в работах Меллер (1928), выполнялись в короткие промежутки времени (8—12 часов), когда ветер практически не менялся, поэтому они могут быть использованы для характеристики влияния сгонно-нагонной циркуляции в прибосфорском районе Черного моря на распределение температуры и солености в Босфоре. Для условий сгона поперечные разрезы расположены на расстоянии 4,4; 6,8 и 8,4 км от Черного моря, для нагона — на 2 и 12,4 км. На всех разрезах, выполненных в периоды сгонов в юго-западном районе Черного моря (т. е. при ветре северо-восточной четверти), прослеживается значительная холодная прослойка. На разрезах, выполненных при нагонах в прибосфорском районе (т. е. при ветрах юго-западной четверти), холодные воды полностью отсутствуют. На рис. 5 приведено два из них: первый — на расстоянии 4,4 км от входа, выполненный при северо-восточном ветре, сгонном для юго-западного района Черного моря (5а); и второй — при юго-западном нагонном ветре на расстоянии 2 км от входа (5б). В таблице 1 приведены данные Мерца по вертикальному распределению температуры и солености в Босфоре на разных расстояниях от северного входа, отобранные для случаев сгонной и нагонной циркуляции в прибосфорском районе Черного моря.

При сгонной циркуляции в прибосфорском районе Черного моря в Босфоре в слое 30—45 м отмечаются холодные воды, при нагонной — холодная прослойка полностью отсутствует. Соответственно, температура придонного слоя нижебосфорского течения в первом случае ниже, чем во втором, а соленость выше.

Таблица 1

Изменение температуры и солености в Босфоре в зависимости от сгонно-нагонной циркуляции в юго-западном районе Черного моря

Горизонты (м)	П р и с г о н н о м в е т р е						П р и н а г о н н о м			
	Ст. 14, расстояние 4,4 км, глубина 69 м		Ст. 3, расстояние 6,8 км, глубина 70,8 м		Ст. 23, расстояние 8,4 км, глубина 65,8 м		Ст. 35, расстояние 2 км, глубина 86 м		Ст. 38, расстояние 12,4 км, глубина 69 м	
	t°	S ⁰ / ₀₀	t°	S ⁰ / ₀₀	t°	S ⁰ / ₀₀	t°	S ⁰ / ₀₀	t°	S ⁰ / ₀₀
0	20,42	17,45	21,80	17,41	20,12	17,56	20,77	17,47	20,70	17,50
10	19,64	17,48	21,30	17,48	19,74	17,57	20,78	17,48	20,70	17,50
20	17,56	17,58	19,36	17,60	19,01	17,60	20,76	17,48	20,69	17,50
25	14,63	17,83	14,15	17,77	19,18	17,61	—	—	—	—
30	11,98	17,83	11,40	17,91	15,12	17,99	20,68	17,49	20,63	17,60
35	—	—	—	—	—	—	—	—	20,30	18,07
40	9,50	19,50	10,37	19,27	12,24	18,91	19,48	21,49	17,80	29,47
45	11,91	25,68	14,06	29,51	15,09	33,24	—	—	17,94	29,48
50	15,40	36,18	15,74	35,91	15,52	36,90	18,00	26,98	16,37	36,17
60	15,69	37,16	—	—	15,58	37,45	16,77	33,98	—	—
65	16,70	37,21	15,88	37,24	—	—	—	—	16,33	36,58
70	—	—	—	—	—	—	16,61	35,05	—	—
80	—	—	—	—	—	—	16,53	35,54	—	—

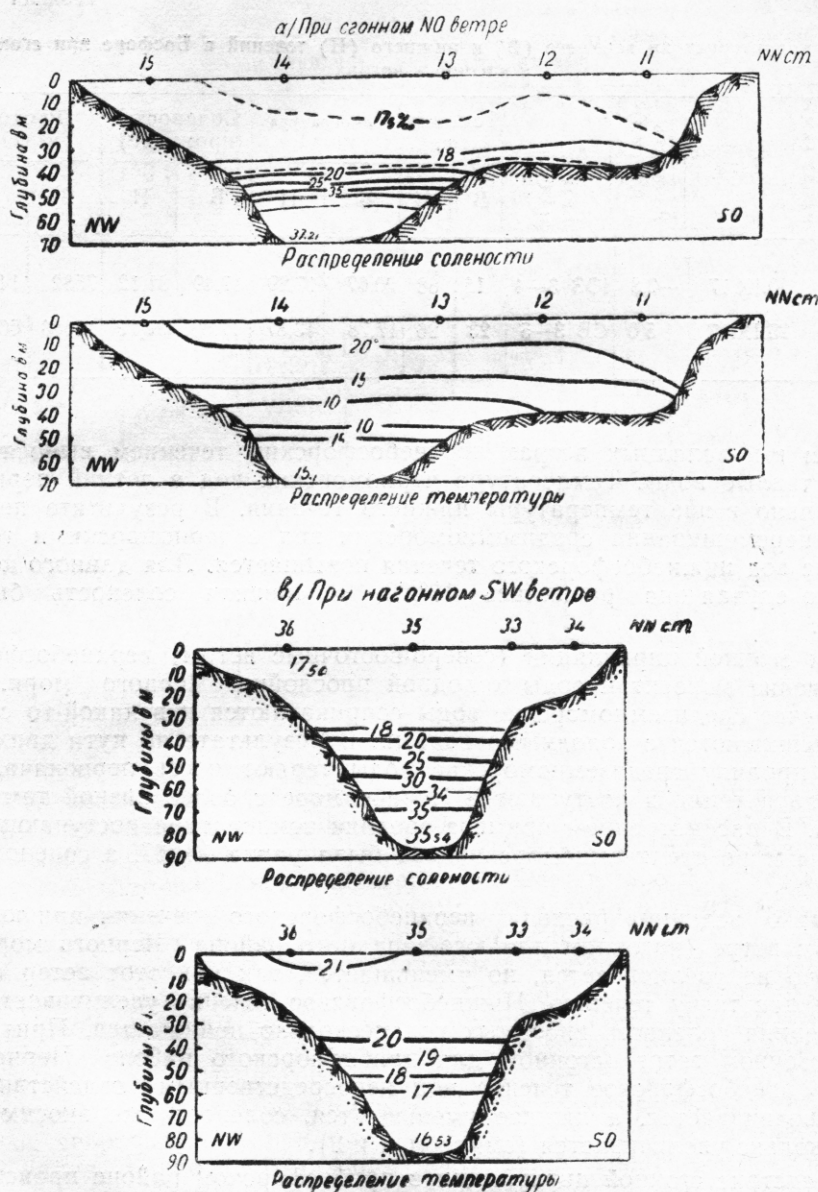


Рис. 5. Распределение солености и температуры по поперечным сечениям Босфора: а) в 4,5 км от северного входа, при сгоне в юго-западном районе Черного моря; б) в расстоянии 2 км, при нагоне.

В таблице 2 приводятся осредненные по всему поперечному сечению гидрологические характеристики верхнего и нижнего течений для 2 разрезов, изображенных на рис. 5. Наблюдения на разрезах выполнялись при юго-западном и северо-восточном ветрах, первые вызывают в прибосфорском районе Черного моря нагоны, вторые — сгоны.

Таблица 2

Средние характеристики верхнего (В) и нижнего (Н) течений в Босфоре при сгонных и нагонных ветрах

№№ раз- резов	Расст. от северн. входа (км)	Дата	Разность давл. (мм)*	Ветер м/сек.	Течение см/сек.		Температура (град.)		Соленость (промилле)		Расход, м³/сек.	
					В	Н	В	Н	В	Н	В	Н
I	2	30.IX.17	—0,8	ЮЗ 3—4	18	68	20,67	17,29	17,49	31,12	7582	14744
II	4,4	25.IX.17	5,0	СВ 3—5	23	26	17,78	13,87	17,60	32,33	16683	6060

При юго-западных ветрах верхнебосфорским течением выносятся только теплые воды. Температура черноморских вод в летний период значительно выше температуры нижнего течения. В результате некоторого перемешивания средиземноморских вод с черноморскими температура вод нижнебосфорского течения повышается. Для данного конкретного случая она равнялась $17^{\circ},29$, а средняя соленость была $31,12\text{‰}$.

При сгонной циркуляции (северо-восточные ветры) верхнебосфорское течение выносит и воды холодной прослойки Черного моря. В этом случае средиземноморские воды соприкасаются и в какой-то степени смешиваются с холодными водами. В результате по пути движения по проливу средиземноморские воды теряют часть первоначального запаса тепла и поступают в Черное море с более низкой температурой. В рассмотренном примере средняя температура поступающих в Черное море средиземноморских вод была равна $13^{\circ},87$, а соленость — $32,33\text{‰}$.

Однако величина расхода верхнебосфорского течения при юго-западном ветре (нагонном для юго-западного района Черного моря) не только не увеличивается, но уменьшается, так как этот ветер направлен навстречу течению. Нижнебосфорское течение увеличивается, хотя средняя соленость вносимых вод несколько понижается. При северо-восточном ветре (сгонном для прибосфорского района Черного моря) верхнебосфорское течение под непосредственным воздействием ветра увеличивается, а нижнее уменьшается, соленость же вносимых вод несколько увеличивается (см. табл. 1 и 2).

Вследствие сгонной циркуляции в прибосфорском районе происходит перемещение части холодных вод из промежуточного слоя Черного моря в его глубины. Глубина опускания определяется разностью плотностей средиземноморских и черноморских вод. Таким образом, сгонно-нагонная циркуляция в прибосфорском районе Черного моря вызывает изменение гидрологических показателей в толще вод Черного моря. В таблице 3 приведены данные по температуре, солености и плотности нижнебосфорских вод для сентября 1917 г. и мая 1918 г. в зависимости от сгонно-нагонной циркуляции (наблюдения А. Мерца) и черноморской воды на глубине 1000 м и у дна.

*) Разность давления между Зунгулдаком и Смирной.

Таблица 3

Сравнительная характеристика средиземноморских вод, втекающих в Черное море, и глубинных черноморских вод

Условия наблюдения	Расстояние в км от северн. входа	Дата	Температура		Соленость		Плотность
			верхне-босфорск. вод	нижне-босфорск. вод	верхне-босфорск. вод	нижне-босфорск. вод	

По отдельным станциям в Босфоре

При сгоне	4,4	V.1918	16,68	13,80	13,17	35,35	26,53
При сгоне	4,4	IX.1917	20,42	15,70	17,45	37,22	27,54
При нагоне	2,0	V.1918	12,56	13,25	15,77	32,94	24,76
При нагоне	2,0	IX.1917	20,77	16,52	17,47	35,77	26,00

По отдельным станциям в Черном море

При восточном ветре	15,7*	VII.1958	—	12,98	—	32,40	24,40
На глубине 1000 м	—	—	—	8,93	—	22,25	17,20
У дна	—	—	—	9,09	—	22,34	17,26

Соленость и плотность нижнебосфорских вод при сгонной циркуляции в юго-западном районе Черного моря как в сентябре, так и в мае, выше, чем при нагонной. Однако в обоих случаях плотность черноморской глубинной воды намного меньше плотности поступающей сюда средиземноморской воды, поэтому последняя под действием силы тяжести опускается и достигает больших глубин.

Средиземноморские воды, вливаясь в Черное море, не движутся непрерывным потоком, как это предполагали ранее. Поскольку течение в прибосфорском районе Черного моря меняется весьма быстро с изменением ветра, то и направление движения средиземноморских вод, втекающих в Черное море, меняется достаточно часто. Поэтому даже при систематическом поступлении нижнебосфорских вод они не образуют непрерывной струи, так как при смене течения в прибосфорском районе Черного моря, ранее поступившие средиземноморские воды замыкаются черноморской водой, образуя локальные области. Эти линзы средиземноморской воды перемещаются по направлению общего потока, постепенно заглубляясь при дальнейшем охлаждении и смешении с черноморскими водами, до тех пор, пока не достигнут глубин с соответствующей плотностью воды.

В тех случаях, когда в Черное море поступают воды с большой соленостью, но невысокой температурой, они опускаются на большие глубины вплоть до самого дна. В летнее время это возможно при сильных сгонах в прибосфорском районе Черного моря; зимой — при

* Станция расположена в 15,7 км к северо-западу от входа в Босфор, наблюдения выполнялись на глубине 78 м в двух метрах от дна.

сильных южных и юго-западных ветрах в Мраморном море и над Босфором. Перемещаются они не непрерывным потоком, а в виде локальных областей, в мелководной части прибосфорского района Черного моря они образуют тонкий слой теплой и соленой воды у самого дна. Для того, чтобы обнаружить ее, нужна подробная съемка с густой сеткой станций и учащенными по вертикали наблюдениями в самом придонном слое моря.

В тех случаях, когда в Черное море вливаются воды небольшой солености, но высокой температуры, как это наблюдалось нами в октябре 1960 г., нижнебосфорские воды растекаются по промежуточным слоям на разных глубинах (150, 200, 300, 500 м и т. д.) в соответствии с их плотностью.

Хорошо выраженная струя средиземноморских вод возможна только при длительной работе ветра одного направления. Однако трудно ожидать сохранения непрерывного потока от выхода из Босфора до дна на больших глубинах, или непрерывного потока по промежуточному слою, поскольку в природе ветер, а следовательно, и течение, меняются очень часто, во всяком случае в прибрежном районе моря (Богданова, 1959).

Смешение средиземноморских вод с черноморскими происходит медленно. На это указывает весьма резкое увеличение солености при переходе от черноморских вод к средиземноморским, как при выходе из Босфора, так и на расстоянии 6, 8 и 11 миль от него. Если для Черного моря, в слое максимального градиента солености, коэффициент турбулентного перемешивания равен примерно $0,1 \text{ см}^2/\text{сек}$. (Богданова, 1959), то в слое соприкосновения средиземноморских вод с черноморскими, где градиент солености в 40—80 раз больше, коэффициент обмена солями, вероятно, будет во столько же раз меньше, т. е. порядка $0,001 \text{ см}^2/\text{сек}$. Итак, сгонно-нагонная циркуляция в юго-западном районе Черного моря, изменяя водообмен, обмен солями и теплом через Босфор, влияет на вертикальное распределение тепла и солей в толще вод Черного моря.

Для количественного определения водного, солевого и теплового обмена необходимы регулярные наблюдения на определенном поперечном разрезе, лучше вблизи северного входа в пролив, с одновременными измерениями ветра и уровня на концах пролива и давлениями в двух пунктах, несколько удаленных от пролива. Такие съемки должны выполняться в короткие сроки и в первую очередь при типичных сгонных и нагонных ветрах (отдельно при Ю, ЮВ и В, СВ; а также при С, СЗ и З, ЮЗ ветрах). Только такие наблюдения позволят получить связи между расходами воды, тепла и соли через пролив с направлением и силой ветра, изменением давления и уровня в юго-западном районе Черного моря.

ВЫВОДЫ:

1. Сгонно-нагонная циркуляция в юго-западном районе Черного моря не только влияет на количественную характеристику водообмена, но существенно изменяет соленость и температуру вод, вытекающих из Черного моря и втекающих в него.

2. Сгонная циркуляция в юго-западном районе Черного моря сопровождается выносом части вод холодной прослойки в Мраморное море. Некоторая часть холодных вод, в результате смешения с нижнебосфорскими водами, возвращается обратно в Черное море, но уже поступает в большие глубины.

3. При нагонной циркуляции выносятся только поверхностные, хорошо прогретые и распресненные воды, холодные воды промежуточного слоя совершенно не затрагиваются верхнебосфорским течением. Температура нижнебосфорских вод (в этих случаях) относительно высокая, а соленость несколько пониженная, поскольку они соприкасаются и в какой-то степени смешиваются с теплыми и распресненными черноморскими водами. Нагонная циркуляция сопровождается, следовательно, более низкой температурой промежуточного слоя Черного моря, поскольку воды холодной прослойки задерживаются в нем, и потеплением глубинных вод.

4. Увеличение повторяемости сгонных ветров ведет к потеплению и некоторому опреснению промежуточных слоев, а также к охлаждению и осолонению глубинных вод. Напротив, уменьшение повторяемости сгонных и увеличение нагонных ветров приводит к охлаждению и осолонению промежуточного слоя, потеплению и опреснению глубинных вод.

5. Изменения в распределении температуры и солености в толще вод Черного моря проявляются не при кратковременных, а только при длительных (не менее года) изменениях повторяемости сгонной или нагонной циркуляции.

6. Для получения количественных связей водного, солевого и теплового обмена через Босфор со сгонно-нагонным ветром, давлением и уровнем необходимы организация регулярных наблюдений по этим элементам на обоих концах пролива, а также наблюдений над течением, температурой и соленостью на определенном поперечном разрезе, лучше у северного входа в пролив.

ЛИТЕРАТУРА:

- Богданова А. К., 1959. Водообмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., т. XII.
- Богданова А. К., 1960. Многолетний ход уровня и материкового стока, как факторы, определяющие изменения гидрологического режима Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., т. XIII.
- Богданова А. К., 1960. Новые данные о распределении средиземноморских вод в Черном море. Тр. Севаст. биол. ст., т. XIII.
- Богданова А. К., 1960. К вопросу о вертикальном перемешивании вод Черного моря. Информ. бюллет. Оргкомитет МГГ при Президиуме АН УССР, № 3.
- Бруевич С. В., 1953. Химия и биологическая продуктивность Черного моря. Тр. Ин-та океанологии, т. VII.
- Водяницкий В. А., 1948. Основной водообмен и история формирования солености Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., т. VI.
- Водяницкий В. А., 1958. Допустим ли сброс отходов атомных производств в Черное море. «Природа», № 2.
- Зубов Н. Н., 1956. Основы учения о проливах Мирового океана. Москва, Географиз.
- Иванов Р. Н. и Богданова А. К., 1953. К вопросу о морских прибрежных течениях. Тр. Морск. гидрофиз. ин-та АН СССР, в. 3.
- Лебедев В. Л., 1953. По поводу водообмена Черного моря. «Метеоролог. и гидролог.», № 4.
- Макаров С. О., 1885. Об обмене вод Черного и Средиземного морей. Санкт-Петербург.
- Рождественский А. В., 1958. Какви течения има пред българския бряг. Рибно Стопанство, № 2—3.
- Шлямин Б. А., 1951. Океанографическое исследование адмирала Макарова в Средиземном море. «Метеоролог. и гидролог.», № 2.
- Якубова Л. И., 1948. Особенности биологии прибосфорского участка Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., т. VI.
- Schmidt J., 1912. Report on the Danish oceanographical expeditions 1908—1910.

- Merz A., 1928. Hydrographische Untersuchungen in Bosporus und Dardanellen, Veröff. d. Inst. f. Meereskunde, N. F. A Geogr. naturwiss. R. H. 18.
- Möller Lotte., 1928. Alfred Merz's hydrographische Beobachtungen in Bosporus und Dardanellen. Veröffentlichungen des Instit. für Meereskunde zu Berlin, N. F. H. 18.
- Pektas H., 1953. Bogazici ve Marmarada Satih Akintilari. Hidrobiologi mecmuasi, seri A, cilt I, sayi 4.
- Pektas H., 1954. Bagazicinde Satih-alti Akintilar ve Su Karisimleri. Hidrobiologi mecmuasi, seri A, cilt II, sayi 1.
- Pektas H., 1956. The influence of the Mediterranean water on the Hydrography of the Black sea. General fisheries council for the Mediterranean. 4-th meeting.
- Ulliyott P. and Ilgaz O., 1948. The Hydrography of the Bosporus, Geogr. Review, January.