ПРОВ 2010

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ТРУДЫ
СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ
ИМЕНИ А. О. КОВАЛЕВСКОГО

Том VI

1872 — 1947

Севастопольская
БИОЛОГИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ
БИБЛИОТЕКА
№ 3815

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1948 ЛЕНИНГРАД

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ТРУДЫ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ. Том VI

В. А. ВОДЯНИЦКИЙ

ОСНОВНОЙ ВОДООБМЕН И ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЕНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Вопрос о взаимодействии поверхностных и глубинных слоев в Черном море является основным вопросом, от решения которого зависят: понимание протекающих в Черном море физических, химических и биологических процессов, его промысловой продуктивности и, может быть, даже возможность в будущем управлять режимом Черного моря. Развитие взглядов на этот вопрос составляет очень важную и чрезвычайно интересную страницу в истории изучения Черного моря. Проблема эта, будучи комплексной по своему характеру, отражает в этапах своего развития прогресс всех наук, связанных с изучением Черного моря. Оставаясь страницей в изучении данного бассейна, эта проблема и ее история, вероятно, внесут некоторую долю и в разрешение общих вопросов океанографии и гидробиологии. В этапах своего развития вопрос о строении Черного моря оказался объектом борьбы различных методологических взглядов, противоречивых тенденций хозяйственного развития бассейна и даже концепций военно-политического характера.

Вместе с тем развитие этого вопроса тесно связано с историей научной деятельности Севастопольской биологической станции, которая на протяжении 75 лет своего существования принимала ближайшее участие во всех важнейших этапах изучения Черного моря.

Излагая проблему водообмена в Черном море, мы постараемся поэтому осветить ее в историческом развитии и полностью представить прошлые и настоящие взгляды исследователей Черного моря на этот вопрос, тесно связав с ними свои собственные выводы.

После того как экспедиции 1890—1891 гг. открыли своеобразные черты гидрологического строения Черного моря, а еще ранее, в 1885 г., было опубликовано исследование С. О. Макарова о водообмене в Босфоре, гидрологи до последнего времени очень мало занимались общим вопросом о строении водной массы Черного моря. В науке установились твердые взгляды на Черное море как на водоем, разделенный по вертикали на две различные зоны, из которых верхняя, снабженная кислородом и населенная организмами, постоянно теряет свои питательные вещества, уходящие с «дождем трупов» вниз, а нижняя зона, более осолоненная, накапливающая эти вещества и различные продукты анаэробных процессов, в том числе и сероводород, отдает лишь незначительную часть этих веществ верхней зоне только в результате очень медленно идущих диффузионных процессов.

Эта схема, созданная в результате блестящих исследований русских ученых — И. Б. Шпиндлера, Ф. Ф. Врангеля, Н. И. Андрусова, А. Ле-

бединцева и А. А. Остроумова, участников первых глубоководных исследований в Черном море, провела резкую грань между Черным морем и всеми другими морями земного шара и оказала решающее влияние на все последующие работы и теоретические представления гидрологов, геологов и биологов, изучавших жизнь Черного моря. Эта первоначальная схема, — правильная в своей основе как рабочая гипотеза, объяснившая многие существенные отличия Черного моря от других морей, — была принята в дальнейшем как абсолютная истина и долго не подвергалась пересмотру ни в какой своей части. Она была настолько самодовлеющей, что не было и речи о ее тщательной проверке; напротив, многие ученые старались подгонять под эту схему и все последующие данные из областей гидрологии, гидрохимии, биологии, зачастую не замечая возникавших противоречий. Геологи, признавая неоднократные смены солеността в бассейне Черного моря в прошлом, наряду с этим, описывая современное Черное море, неизменно повторяли установленные взгляды, как бы забывая основную истину геологии, что прошедшие и современные процессы в основном сходны. Отдельные скромные попытки внести поправки не были замечены в общем потоке однородных высказываний. Основная причина задержки углубленного исследования гидрологии Черного моря ложит прежде всего в том, что профессиональные океанографы, которые в течение десятков лет накапливали бесконечное количество гидрологических данных по Черному морю, ограничивались стандартным оформлением материалов, не применяя к этим данным методов физико-математического анализа современной океанографии, а также упускали из виду иногда и простые соображения здравого смысла. Исключением являются единичные работы, касающиеся частных вопросов. Представители других научных дисциплин подчинились авторитету гидрологов, а впоследствии и гидрохимиков, недостаточно критически воспринимая их повторяющиеся суждения. Для гидрологов-практиков, быть может, в ряде случаев было достаточно принять основное положение о раздельности процессов в нижней и верхней зонах Черного моря. Но теоретический вопрос о структуре подобного водоема в его динамическом единстве был забыт, и это упущение опростило дальнейшую гидрологическую работу на Черном море; затемнило комплексную связь ее с другими науками и оказало подавляющее влияние на развитие гидрохимических и биологических представлений о Черном море.

С подобным схематическим упрощением примирялся и геолог, вероятно принимая его подсознательно лишь как некий моментальный снимок с отрезка длительного процесса. Но для гидробиолога вопрос о взаимодействии нижних и верхних слоев и обмене веществ между ними есть кардинальный вопрос, от которого зависит суждение об основном биологическом процессе в море — ежегодно повторяющемся продуцировании живого вещества.

Для гидробиолога это вопрос не схоластический, как, быть может, для гидролога-прикладника, и не только исторический, как для геолога, а животрепещущий вопрос сегодняшнего дня, вопрос, в буквальном смысле слова, жизни или смерти для обитателей моря. Поэтому естественно, что именно со стороны гидробиологов в последнее время были сделаны первые попытки к пересмотру этой проблемы, поскольку нарастающие данные вступили в проти оречие с принятыми схемами. Эти попытки, начатые нами в 1935 г., хотя и нашли значительный отклик в последующем ходе биологических исследований на Черном море и во взгляде на его промысловые богатства, однако среди значительной части ученых были встре-

чены весьма скептически. Одни говорили, что предположение о водообмене между нижней и верхней зонами Черного моря является нелепостью, противоречащей законам физики. Другие утверждали, что ежегодное возобновление запасов биогенных веществ достаточно обеспечивается приносом реками, а потому и нет необходимости прибегать к предположению о поступлении этих веществ из глубинных слоев. Третьи просто ставили под сомнение все предшествовавшие определения запасов биогенных веществ в Черном море, хотя эти определения в нашей литературе принято именовать образцовыми. Наконец, четвертые, вступая в противоречие с гидрологической литературой, заявляли, что никто и не отрицал раньше водообмена между поверхностными и глубинными слоями в Черном море.

Прошло более десяти лет с тех пор, как этот вопрос был поставлен. С 1938 г. автор был оторван от научной работы на Черном море. Сейчас, когда снова предстоит проводить комплексные исследования на Черном море, возникает необходимость пересмотреть этот основной вопрос его жизни, так как от той или иной рабочей гипотезы будут зависеть и программа и детали исследований. Появившиеся за последние годы работы дают новый толчок развитию вопроса о строении Черного моря и протекании в нем жизненных процессов. Весьма полезно также ознакомиться с тем, как представляли себе эту проблему основные исследователи Черного моря. В этой статье рассматриваются в общей связи вопросы о водообмене в Босфоре, общем балансе вод Черного моря, о взаимодействии его верхних и нижних слоев и об истории формирования солености вод Черного моря. К рассмотрению этих вопросов автор подходит не как специалист-гидролог, а как гидробиолог, стремящийся в меру своих возможностей к построению комплексного представления о Черном море с учетом биологических данных.

Еще в 1907 г. О. Крюммель в своей «Океанографии» писал, что «течения в Босфоре являются классической темой для исследователей морей». Позже, в 1917—1918 гг., Босфор был заново подробно изучен германским гидрографом А. Мерцем (исследования обработаны Л. Мёллер и опубликованы в 1928 г.). В последние годы (1942—1944) в турецких изданиях появился ряд работ по гидрографии и гидрологии Босфора, выполненных англичанином Ф. Иллиотом (Ullyott) и турком О. Ильгазом (Ilgaz). Наконец, в американском журнале «Geographical Review» (январь 1946 г.) появилась сводная статья этих авторов «Гидрография Босфора», в которой излагаются основные результаты их новейших исследований над течениями в Босфоре, обменом вод между Босфором и Черным морем и общим балансом вод в последнем.

Работа Иллиота и Ильгаза содержит совершенно новый взгляд на современный обмен вод между Босфором и Черным морем. Поскольку данный вопрос представляет первостепенный интерес для самых разнообразных отраслей науки (гидрологии, геологии, гидробиологии), для судоходства, а также для водного хозяйства в широком смысле этого слова, работа заслуживает большого внимания. Вместе с тем выдвигаемые в ней положения вызывают ряд серьезных сомнений. Излагая суждения своих предшественников: Спратта (Spratt, 1870—1871), Макарова (1885), Вартона (Wharton, 1886), Маньяги (Magnaghi, 1892), Мерц — Мёллер (Mertz — Möller, 1928), авторы отмечают, что все исследователи держались одного и того же взгляда на обмен вод между Черным морем и Босфором. Считалось, что поверхностные слои текут из Черного моря по проливу в Мраморное море, в то время как нижние слои пролива

движутся в обратном направлении, принося в глубины Черного моря воду Мраморного моря, имеющую свыше 36 г солей на литр воды. Поступление в глубины Черного моря воды с высокой соленостью должно создавать и поддерживать хорошо известные особенности гидрологического строения Черного моря, т. е. неравномерное распределение солености в толще его вод со всеми происходящими отсюда последствиями для гидрологии, биологии и геологии этого моря. Наличие этих двух течений в Босфоре, не только поверхностного, но и встречного глубинного, издавна было хорошо известно местным жителям. Глубинное течение в Босфоре называется по-турецки Kanal.

Авторы считают, что действительная роль глубинного течения в проливе и его взаимоотношения с поверхностным течением не таковы, как это описывалось прежними исследователями, в том числе А. Мерцем и Л. Мёллер. Последние установили (вернее — подтвердили в этом отношении данные Макарова), что поверхность раздела между этими двумя течениями не горизонтальна, а наклонена по направлению к черноморскому северному концу пролива: у южного мраморноморского конца пролива вода с повышенной соленостью обнаруживается в среднем на глубине 20 м, а у северного — 50 м. Этот наклон соответствует в грубых чертах и общему наклону дна Босфора с юга на север. Иллиот и Ильгаз вносят поправку: непосредственно у выхода из Босфора в Черное море, где на разрезе Анадолу Фенери — Румели Фенери глубина превышает 70 м, начинается подъем дна, образующий в прибосфорском участке Черного моря род порога, поднимающегося до 50 м и, очевидно, представляющего препятствие проникновению глубинного потока в Черное море. Подъем дна должен вызывать тенденцию вод глубинного потока подниматься кверху, причем они должны столкнуться с нижними слоями поверхностного потока, идущего в противоположном направлении, и в какой-то степени быть ими захваченными и повернутыми обратно к югу в сторону Мраморного моря.

Основная мысль авторов и заключается в том, что глубинный поток в действительности не является поставщиком высокосоленой воды, якобы поступающей в Черное море в больших количествах, как это думали раньше. На схематическом чертеже авторы полностью поворачивают все глубинное течение на границе порога кверху и обратно в Мраморное море. Более того — по всей поверхности раздела двух течений, по мнению авторов, происходят такие же возвратные потоки. Результатом этого является непрерывное повышение солености верхнего течения даже в поверхностных слоях, и именно на $2^0/_{00}$ на протяжении от северного конца пролива к южному (что было известно и раньше).

Схема течений в проливе, которая считалась общепризнанной, по мнению авторов, в действительности наблюдается только при «нормальной» погоде, когда на глубине в среднем 40 м устанавливается граница раздела двух потоков. При усиливающихся северных ветрах, вообще говоря преобладающих, верхнее течение резко усиливается, граница между потоками опускается до 45 м, а соленость глубинного потока уменьшается от 36—37 до $25^0/_{00}$. При усиливающихся южных ветрах поверхностное течение ослабевает, верхний поток оказывается неоднородным по солености и дает с глубиной непрерывное повышение от 22 до $30^0/_{00}$. Авторы устанавливали подводные самописцы и считают, что предшествующие исследования экспедиционного характера не дали полной картины динамики вод пролива и ее зависимости от погоды. Была сделана гидравлическая модель пролива, которая при испытании подтвердила схему ав-

торов и показала возвратный глубинный поток по границе раздела двух течений.

Иллиот и Ильгаз проводят сравнение с течениями в Керченском проливе и дают некоторые соображения общего характера, долженствующие подтвердить их гипотезу. Мерц и Мёллер на основании своих наблюдений над глубинным течением признали, что это течение приносит в Черное море ежегодно около 200 км³ воды с высокой соленостью. Принимая продолжительность ныне действующих взаимоотношений Черного и Мраморного морей в 5000 лет (на основе геологических данных), получаем, что за это время в Черное море поступил 1 млн. км³ воды из Мраморного моря, т. е. объем, вдвое превышающий его собственный. Иллиот и Ильгаз считают это совершенно невероятным, так как в таком случае соленость Черного моря была бы в среднем не 21—22‰, как теперь, а гораздо выше, что и должно также, по мнению авторов, доказывать, что нижнее босфорское течение вовсе не является и не являлось таким мощным потоком, как его принимали прежние исследователи. Авторы развивают соображения, долженствующие послужить для построения общего баланса вод Черного моря и косвенно для суждения о режиме течений в проливе. Отрывок из названной статьи мы должны процитировать дословно:

«Соленая вода нижнего течения в Босфоре происходит из глубин Мраморного моря, а поверхностная вода Мраморного моря образуется водой поверхностного течения из Босфора. Поверхностный приток в Мраморное море образуется от смешения глубинной воды, которая вливается в Босфор, с водой, вытекающей из Черного моря. Глубинная вода Мраморного моря, таким образом, постоянно расходуется вследствие ее притока в Босфор и включения ее в поверхностное течение, а также благодаря смешению и возвращению ее как поверхностной воды.

«Глубинная вода Мраморного моря должна постоянно пополняться притоком воды из глубин Эгейского моря. Предпосылка нашей гипотезы есть, следовательно, то, что порог в Дарданеллах между Эгейским и Мраморным морями достаточно глубок, чтобы пропускать глубинную воду из Эгейского моря. Самая мелкая часть в сообщении между двумя морями в северо-восточной части пролива имеет глубину около 65 м, достаточную для пропуска глубинных вод. Это заключение не ново; оно высказывалось прежними исследователями Босфора, включая Мерца, гипотеза которого, подобно нашей, требует такого течения.

«Вторая предпосылка нашей гипотезы есть то, что поступление воды в Черное море с речным стоком находится в таком отношении к ее потере путем испарения и оттока через Босфор, что не имеется надобности в притоке воды через Босфор для достижения равновесия. Мерц и Мёллер подсчитали баланс воды для Черного моря таким образом, что он требовал притока из Босфора. Их оценка притока и оттока была грубой, и они, несомненно, переоценили величину испарения с Черного моря.

«Мы отказываемся от предложенного баланса для Черного моря, как не имевшего достаточных количественных данных для стока рек в Черное море и испарения с его поверхности. Он включает рассмотрение скорее всего бассейна стока Черного моря в целом, чем самого Черного моря. Оказывается, что бассейн стока Каспийского моря по площади почти равен бассейну Черного моря и расположен почти в тех же границах широты. Оказывается также, что в Каспийском бассейне стока в среднем осадки в точности уравновешиваются испарением. Далее, осадки есть нечто измерявшееся издавна во многих местах в бассейнах стока Каспийского и Черного морей, и среднее количество осадков в этих

бассейнах может быть правильно подсчитано. Если в Каспийском бассейне испарение равно осадкам, то средняя высота столба осадков в этом бассейне есть также и средняя толщина слоя испарения.

«Применяя эти факты, касающиеся Каспийского бассейна, к вопросу о стоке воды из Черного моря через Босфор, мы сделаем такое разумное предположение: общее годовое испарение с бассейна стока Черного моря не превышает такового с бассейна Каспийского моря. В действительности, более вероятно, что испарение с бассейна Черного моря заметно меньше, чем с бассейна Каспийского моря. Приняв их равенство, мы можем получить величину годового избытка воды в Черном море посредством вычитания каспийских осадков из черноморских. Полученная таким образом величина, нужно подчеркнуть, является минимальной.

«Годовой избыток воды в бассейне стока Черного моря должен быть равен оттоку из него через Босфор. Количественное выражение этого баланса следующее.

«Площадь бассейна стока Черного моря в круглых числах составляет около 4 млн. км². Средняя годовая разница в высоте столба осадков между ним и Каспийским бассейном, т. е. принятая нами минимальная оценка избытка осадков над испарением в бассейне Черного моря, составляет около 25 см. Так как разница в 1 см в год между двумя бассейнами дает избыток объема в 40 км³ воды в год, то общий избыток объема должен составить 1000 км³. Этот итог соответствует избытку объема в 33.4 тыс. м³ в секунду. Поперечное сечение верхнего течения в Босфоре около Румели Гизар составляет около 32 тыс. м², таким образом, средняя скорость течения, необходимого для вытекания избытка воды, равна примерно 1 м в секунду. Эта величина немного выше, чем скорость, наблюдаемая при нормальных условиях в Босфоре. Очевидно, нет места для сколько-нибудь значительного увеличения в общем приходе воды в Черном море при посредстве нижнего босфорского течения. Баланс воды в Черном море, как это очевидно для нас, подводится без притока через Босфор».

Позволим себе представить эти несколько сложные рассуждения в виде схематических положений:

1. Бассейн стока Черного моря равен бассейну стока Каспийского моря.

2. Атмосферные осадки бассейна Каспийского моря равны испарению с бассейна Каспийского моря.

3. Годовое испарение с бассейна стока Черного моря равно годовому испарению с бассейна Каспийского моря.

4. Годовой избыток воды в Черном море равен атмосферным осадкам бассейна Черного моря минус атмосферные осадки бассейна Каспийского моря, т. е. равен 25 см осадков, умноженным на 4 млн. (площадь бассейна), и составляет 1000 км³ воды.

Удивительно, что авторы избрали столь обходной путь рассуждений, притом подкрепленный слабо доказанными предпосылками. Публикуя свои результаты в авторитетном географическом журнале и после того, как гидрологический режим Босфора уже неоднократно и тщательно изучался и имелись высказывания относительно общего баланса вод в Черном море, авторы должны были бы тщательнее обосновывать свои доказательства фактическими данными. Из материалов, имеющихся в печати, следует, как нам кажется, сделать иные выводы.

Среднее количество осадков на береговых станциях Черного моря составляет 700 мм, или 280 км³ на поверхность моря. В отношении дебета рек Лоция Черного моря 1937 г. для Дуная, Днепра, Днестра и Буга

дает годовую величину в 340 км³, каковое количество воды поднимает уровень моря на 85 см. Болгарский автор Б. Ангелов (1935) считает, что приток всех речных вод ежегодно поднимает уровень Черного моря на 0.862 м. Даже увеличив эту цифру за счет Дона, Кубани и других неучтенных рек до 120 см, получим приток рек, равный 480 км³ с явным преувеличением. Вместе с осадками это составит около 760 км³. В отношении испарения Лоция дает следующие величины: Одесса — 600 мм, Севастополь — 840 мм, Поти — 940 мм. Если примем среднее для моря равным 600 мм, получим испарение, равное 240 км³, а общий избыток вод в Черном море — 520 км³ (с преувеличением), а не 1000 км³, как утверждают Иллиот и Ильгаз.

Еще И. Б. Шпиндер (1896) после экспедиции на «Селянике» дал довольно основательный расчет для водного баланса Черного моря. Собрав данные о расходах главных рек, он получил, что реки дают в год 474 км³, или слой воды в 1242 мм. Сопоставив количество осадков на всех побережьях моря, он принял за среднее для всего моря 577 мм, а по наблюдениям над испарением в ряде пунктов — 609 мм. В результате получился избыток пресных вод в 1210 мм, или 461.67 км³, или в час 52 701 992 м³. Поперечное сечение верхнего течения против Константинополя: ширина — 1000 м, глубина — 20 м, площадь — 20 тыс. м². Вычисленная скорость в секунду равна 0.73 м, или 2.4 фута. Действительно наблюденная скорость этого течения на всех глубинах была 2.3 фута.

«Эта скорость,— говорит Шпиндлер,— определена всего из 13 наблюдений 19—20 июля, но нет сомнения, что средняя скорость бывает больше, особенно вслед за половодьем рек. Но для этого получается еще запас воды в Черном море путем нижнего течения через Босфор — запас, поддерживающий и питающий, таким образом, верхнее течение; часть такого запаса, вероятно, расходуется еще и на испарение, так как принятая нами величина годового испарения, измеренная в испарителях, устанавливаемых не на открытом воздухе, несомненно, менее действительного в море. Таким образом, эти вычисления показывают, что излишек вод, доставляемых реками, более чем достаточен для объяснения происхождения и постоянства верхнего босфорского течения. Но этот излишек неравномерно распределяется над Черным морем. Особою системой ветров он накопляется преимущественно у Босфора, отчего напор увеличивается и босфорское течение усиливается. В самом Босфоре условия ветров также благоприятны усилению и постоянству течения.

«Так как нижним босфорским течением доставляется в Черное море соленая вода, а верхним течением уносится опресненная, то с течением времени Черное море должно делаться солонее, и если бы оно достигло той же солености, что и Мраморное море, но реки его продолжали доставлять то же самое количество вод, что и теперь, то, при нынешних условиях ветров, все же эти воды продолжали бы изливаться через Босфор в Мраморное море и далее с известною силой».

В приведенных выше соображениях Иллиота и Ильгаза многое представляется нам мало убедительным. Еще в 1910 г. Датская экспедиция в Средиземное море подтвердила наблюдения глубоководной экспедиции 1890—1891 гг., что в прибосфорском районе Черного моря на дне имеются струи мраморноморской воды с высокой соленостью. Эти данные были подкреплены и дополнены позднейшими экспедициями, причем намечались даже направления потоков. А. А. Остроумов в 1890 г. нашел здесь ряд средиземноморских животных, отсутствующих в остальном Черном море. Этот список в дальнейшем пополнялся С. А. Зерновым

и В. Н. Никитиным. В 1935 г. Л. В. Арнольди сделал сборы бентоса у Босфора и снова доставил ряд средиземноморских видов, определенных им совместно с Л. И. Якубовой. В работе Якубовой приводится сводный список 20 видов животных, встречающихся в Черном море только в прибосфорском районе и к северо-западу от него.

Кроме того, ряд видов моллюсков и иглокожих был найден здесь в виде мертвых частей. Эти данные, казалось бы, с несомненностью устанавливают проникновение в Черное море мраморноморской воды, дающей возможность существования перечисленным животным на пространстве до 25 миль к северо-западу от устья Босфора.

Наблюдения авторов, устанавливающие поворот в обратном направлении верхних слоев нижнего течения, не являются неожиданными, так как для Дарданелл, где имеются такие же два противоположных течения, подобное явление уже было известно ранее. Но если авторы считают, что вода нижнего босфорского течения полностью возвращается в Мраморное море, постепенно включаясь во встречный поверхностный поток, то в чем же они усматривают ту потерю воды из Мраморного моря, которая должна, по их мнению, компенсироваться притоком с нижним течением из Эгейского моря через Дарданеллы? В этой части рассуждений авторов имеется явное логическое противоречие. Наконец, совершенно неправильно относить происхождение этих течений только за счет избытка воды в Черном море или механического действия ветра. Еще первый исследователь Босфора Марсильи в XVII в. показал, что подобные течения устанавливаются в канале, соединяющем сосуды с водой разных солеcertainостей под влиянием различия в плотности воды в разных сосудах, и это явление было подробно переисследовано С. О. Макаровым. Авторы считают, что если бы за 5000 лет в Черное море влились два объема воды с соленостью 36‰, то нынешняя соленость Черного моря была бы значительно выше действительно наблюдаемой. Но авторы игнорируют тот факт, что за эти же 5000 лет Черное море получало по их же подсчетам (они принимают, что общие условия в течение этого периода были в среднем устойчивыми) ежегодно 1000 км³ пресной воды, которая, смешиваясь с черноморской, вытекала через Босфор уже не в виде пресной воды, а в виде поверхностной воды Черного моря с соответствующей соленостью. За 5000 лет эти пресные воды составили бы 10 объемов Черного моря. Если даже взять половину этого количества пресной воды, то не трудно высчитать, что для получения из первоначального объема воды, при условной начальной $S = 12‰$ и пяти объемов пресной воды, воду с нынешней соленостью Черного моря потребовалось бы шесть объемов средиземноморской воды, а не два, против которых авторы возражают как против излишних. Эта часть рассуждений авторов совершенно неосновательна. Мы видели, что подсчет баланса воды в Черном море авторы вели на основании ряда допущений и примерных сопоставлений, а при этих условиях невозможно требовать, чтобы полученная величина, именно 1000 км³ избыточной воды, отличалась абсолютной точностью. В лучшем случае она может указывать порядок величины при известных допущениях. Между тем количество воды, втекающей в Черное море с нижним течением, С. О. Макаров определяет в 212 км³ в год, а Мерц и Мёллер в 200 км³, т. е. в таких объемах, которые безусловно умещаются в пределах точности определения проблематичного избытка пресных вод (вероятно, как мы видели, определенного со значительным завышением, поскольку для пропуска через Босфор 1000 км³ требуется непрерывная работа верхнего течения с полным напряжением в течение всего года, чего не бывает,

так как при тихой погоде верхнее течение в проливе ослабевает, а при южном ветре даже принимает противоположное направление).

Предполагать, что подобный годовой расход воды (1000 км³) происходил на протяжении сколько-нибудь длительного периода, нет никаких оснований, так как с этим необходимо связано предположение авторов о подавленности нижнего течения; следовательно, в таком случае всего лишь на протяжении последних 500 лет Черное море пропустило бы 500 тыс. км³ пресной воды, не получая соленой, т. е. должно было бы опреснеться вдвое, что является явной нелепостью.

Неверно утверждение авторов, будто предшествовавшие исследования носили только экспедиционный характер и потому не дали правильной картины течений. С. О. Макаров изучал течения в Босфоре с ноября 1881 г. по август 1882 г. и в ряде случаев проводил длительные и систематические наблюдения. Это отмечено не только в русской работе Макарова, но и в «Handbuch der Oceanographie» Крюмелля.

Насколько можно судить по статье, авторы сами не производили непосредственных наблюдений в области черноморского порога, и в отношении его влияния на нижнее течение они ограничились лишь предположениями. Возможно, что режимы течений в самом Босфоре благодаря их исследованиям оказались более изученными, чем ранее, и обращено внимание на такие детали, с которыми, вероятно, придется считаться на практике. Что же касается вопроса о водообмене с Черным морем, то он далек от решения и требует дальнейших исследований.

В концепции авторов совершенно необъяснимо то обстоятельство, что если в настоящее время нижнее течение не достигает Черного моря, а в то же время наблюдается отток поверхностных вод в количестве 1000 км³ в год, то, следовательно, в настоящее время происходит процесс быстрого опреснения Черного моря. Каким же образом можно экстраполировать эти соотношения на прошедшие 5000 лет, если мы будем считаться с тем, что за этот промежуток времени Черное море не опреснялось, а осолонялось и превратилось из солоноватого бассейна (вероятно, с соленостью, близкой к современной солености Каспийского моря, т. е. 12‰) в бассейн со средней соленостью 21—22‰?

Мы должны рассмотреть обстоятельнее развитие взглядов на вопрос об общем балансе вод Черного моря и строении его водной массы. Мы не будем излагать первоначальную классическую концепцию гидрологов, вошедшую в обиход с девяностых годов прошлого века, многократно изложенную во всех сводках и учебниках океанографии и бесконечно повторяемую в лекциях. Обратимся к высказываниям тех ученых, которые искали согласования гидрологической концепции с данными других наук.

Вот что писали по этому вопросу наши крупнейшие знатоки Черного моря — геолог Н. И. Андрусов и биолог С. А. Зернов в 1914 г.: «Вертикальные течения, образующиеся вследствие охлаждения поверхностных слоев, не могут итти в Черном море глубже 100—125 саж.: их останавливают слои более плотной нижней воды, так как увеличение плотности верхних слоев под влиянием охлаждения все же не достигает величины плотности нижних слоев. Обмен вод в них может совершаться лишь следующим образом. По Макарову, верхнебосфорское течение уносит из Черного моря ежесекундно 370 тыс. куб. фут. (в год около 322 куб. верст, или 390 км³), а нижнебосфорское вносит в Черное море 200 тыс. куб. фут. ежесекундно (175 куб. верст, или 212 км³ в год). Разница в 147 куб. верст представляет цифру, выражающую избыток притока пресных вод в Черное море с суши (реки) и атмосферы (дождь) над испарением. Если бы Черное

море не получало притока из Мраморного, а лишь стекало в последнее, то понадобилось бы около $2^1/_2$ тыс. лет для полного обновления вод в Черноморском бассейне. Теперь эти воды протекают в Черное море, так сказать, лишь через верхний «живой» слой. Так как объем слоя в 100 сажень равен приблизительно 85 тыс. км^3 (около $^1/_5$ всего объема), то для этого стекания (полного обмена) требуется уже всего около 400 лет, но одновременно с поступательным движением к Босфору слой этот постоянно перемешивается конвекционными вертикальными токами, а в верхних своих частях течениями и ветрами. Иначе обстоит дело с нижним («застойным») слоем воды, представляющим более $^4/_5$ всего объема воды Черного моря. Смена воды в нем должна происходить чрезвычайно медленно. Тяжелая вода нижнего босфорского течения, как говорит Шпиндлер, выйдя из пролива, стекает в глубины Понта по нескольким руслам; она отчасти смешивается с опресненной водой верхних слоев, но главным образом стекает в глубины Понта, медленно и постепенно вытесняя воды кверху и ежегодно вводя в верхний живой слой некоторую массу воды. Если даже предположить, что вся вода, подаваемая нижнебосфорским течением, стекает вниз (в действительности меньше), и то ежегодное количество воды, доставляемое в глубокую котловину Понта, будет равно всего лишь около $^1/_{700}$ объема нижнего слоя. Для полного вертикального перемещения воды, очевидно, идущего снизу вверх, необходим промежуток времени более 1500 лет».

Мысль о взаимосвязи верхних и нижних слоев, высказанная в этом отрывке из «Путеводителя по Крыму», проскальзывала и ранее — в статьях Н. И. Андрусова, но, сознавая очевидную необходимость допущения такой связи, Андрусов все же не решился конкретизировать возможные размеры этого внутреннего водообмена; гидрологи же не придали значения этим высказываниям и, вероятнее всего, даже их не читали. Между тем статьи Андрусова по разносторонности понимания предмета и научной проникновенности должны были сыграть большую роль в дальнейшем развитии идей о строении Черного моря.

Еще ранее (1894) Андрусов писал: «Геологические факты доказывают, что некогда в бассейне Черного моря сероводородного брожения не было или что оно проявлялось в такой же незначительной степени, в какой мы имеем основание предполагать его в других морях. За моментом наступления условий, благоприятных для брожения (исчезновение полной вертикальной циркуляции), должна была следовать также, конечно, фаза постепенного усиления, которое, наконец, должно было достигнуть известного максимума соответственно известному равновесию условий. Лишь изменение этого равновесия могло бы изменить размеры брожения. Таких изменений с начала сероводородного брожения мы знаем только два: понижение уровня Черного моря и изменение климата. Со времени соединения Черного моря с Средиземным (этот момент мы и должны признать за начало брожения) общая сумма относительных движений уровня в Черном море является отрицательной. Возможно, что с тех пор уровень Черного моря падал ниже нынешнего; это остается пока недоказанным, и из присутствия морских потретичных ракушников на известной высоте мы можем заключить, что сначала черноморский уровень был выше современного, что, следовательно, обмен вод в Босфоре вследствие большого поперечного его сечения был оживленнее, а это в свою очередь должно было отражаться на относительном понижении верхней границы сероводородного брожения. Этому понижению должно было противодействовать то обстоятельство, что климат в начале эпохи сероводородного брожения,

вероятно, совпадавшем с концом ледниковой эпохи, был влажнее, испарение, следовательно, меньше, приток пресной воды был значительнее, а эти оба явления должны были уменьшать размеры слоя живой циркуляции, следовательно относительно повышать верхний предел сероводородной области. С приближением к современной эпохе понижение уровня, через ослабление обмена в Босфоре, должно было относительно повышать названный верхний предел, а изменение климата в сторону более сухого, наоборот, понижать его. Мы, однако, лишены пока всяких критериев, чтобы судить количественно о взаимодействии этих двух факторов. Скорее всего можно думать, что Черное море находится в течение уже довольно продолжительного времени в известном относительном равновесии и ничто не свидетельствует о том, что в будущем сероводородное брожение Черного моря должно усилиться... Лишь крупные физико-географические явления были бы в состоянии произвести значительные изменения в размерах брожения или положить ему конец. Таковы резкие изменения климата, поднятие уровня Черного моря или его опускание, могущее вести к отделению Черного моря от Средиземного, опускание его дна, расширение Босфора».

Возражая против мнения Н. Д. Зелинского и О. О. Брусиловского об обреченности Черного моря на количественную бедность жизнью в силу ухода питательных веществ в глубинные слои и невозвращения их на поверхность, Н. И. Андрусов (1894) говорил: «Фауна Черного моря бедна качественно, но не количественно. У нас не имеется статистических данных для относительной оценки количественного богатства черноморской фауны, да и вообще такая оценка, по крайней мере для данной фауны, едва ли мыслима. Во всяком случае количество живого органического вещества, приходящегося на одну единицу поверхности обитаемой части черноморского дна или на одну единицу объема верхнего обитаемого слоя, едва ли менее того, что наблюдается в океанах и других морях... Если припомнить обилие рыбы в Черном море, нуждающееся для своего пропитания в соответственно количественно богатой фауне и флоре, то можно, пожалуй, ожидать, что количественно черноморская фауна и флора превосходит фауну открытых морей».

Н. М. Книпович (1930), хотя и не имел еще данных, чтобы высказаться определеннее, но все же своим верным взглядом знатока природы морей уловил недооценку продуктивности открытых вод Черного моря. Он писал: «Черное море сравнительно бедно планктоном; тем не менее верхние слои открытого моря, как показали наши исследования, не должны считаться бесплодными в рыбопромышленном отношении...»

Существенный сдвиг в комплексном изучении Черного моря представила серия гидрохимических исследований П. Т. Данильченко и Н. И. Чигирина, выполненная в двадцатых годах. Эти авторы выразили свои взгляды на общий обмен веществ в Черном море в статье 1929 г.:

«В глубинах Черного моря концентрация питательных минеральных соединений, судя по количеству азота, в 10—15 раз выше, чем на поверхности. Это говорит о том, что Черное море давно было бы безжизненным, если бы оно не получало питательные минеральные соли и органические вещества извне и если бы не происходило проникновения глубинных сероводородных вод, богатых продуктами минерализации органических веществ, в световую зону.

«Обеднение окислительной зоны живым веществом, повидимому, продолжалось до известного момента, пока указанное выше равновесие, живое вещество моря $\rightleftarrows$ питательные минеральные и органические соединения,

смещенное слева направо недостатком в Черном море питательных веществ, вновь не установилось на некотором пределе или, другими словами, пока содержание живого вещества в Черном море не определилось тем количеством питательных минеральных соединений, которое находилось в его верхних слоях и пополнение которого в связи с накоплением этих соединений в глубинах происходило за счет приноса питательных веществ извне, а также за счет тех продуктов минерализации органических соединений, которые выносились из сероводородной области Черного моря в световую зону».

Итак, отсюда можно сделать вывод, что авторы признавали какой-то вынос веществ из нижней зоны в верхнюю. На чем же основан этот процесс? Читаем в той же статье: «Вследствие застоя вод восстановительной зоны проникновение продуктов минерализации органических веществ из сероводородной области в населенные слои Черного моря может совершаться лишь с весьма незначительной скоростью и то только диффузией солей из глубин и путем поднятия глубинных сероводородных вод теми более солеными водами, которые вливаются в Черное море из Босфора. Поэтому не приходится говорить ни о наличии в Черном море сколько-нибудь интенсивного обмена веществами между водой зоны окисления и ее донными отложениями, ни о быстром проникновении питательных минеральных соединений в световую зону».

В статье Н. И. Чигирина о фосфоре в Черном море (1930) мысль эта доведена до крайности: «Ни концентрацией воды (?) вследствие испарения в летнее время, ни максимальным охлаждением зимой плотность поверхностных вод не может быть доведена до плотности большей, чем имеет вода на глубине 150 м, и заставить поверхностные воды опуститься ниже этих глубин. Практически же циркуляция вод, как об этом можно судить по распределению кислорода и концентрации водородных ионов, в Черном море заканчивается несколько выше. Вследствие стагнации вод ниже 150 метров, продукты минерализации абиосестона, опустившиеся до больших глубин, не могут вновь вступить в состав живого вещества, а остаются и накопляются в глубинах».

Любопытно, что незадолго перед тем, в докладе на Всесоюзном гидрологическом съезде в 1928 г. по вопросу о распределении кислорода в Черном море Н. И. Чигирин подходил (по его личным заявлениям,— работа же не опубликована) к необходимости допущения смешения слоев ниже глубины термической конвекции, но в дальнейших своих работах он полностью отказался от этой идеи и, подчинившись общепринятой гидрологической теории, стремился подвести под нее свои гидрохимические данные, давая им вследствие этого в ряде случаев неверное истолкование, как это выяснилось впоследствии.

Первоначальное предположение о том, что вода Черного моря по своему составу представляет какие-либо специфические особенности, подобно, например, воде Каспийского моря со своеобразным отношением частей солевого состава, уже оставлено.

В этом отношении довольно долго существовали определенные преувеличения и заблуждения. Так, М. А. Добржанская, работавшая под руководством компетентных гидрохимиков, предполагала, что повышенную щелочность вод Черного моря можно в значительной степени отнести за счет первичной солености вод Эвксинского бассейна!

Н. М. Книпович воздерживался от перевода величины содержания хлора в черноморской воде в общую соленость путем применения установленного для океанических вод известного коэффициента, на котором построены таблицы Кнюдсена, опасаясь возможности некоторой ошибки, величина которой неизвестна.

После этого, на основе ряда анализов, был установлен состав солевой массы Черного моря и пересмотрены данные предшествовавших анализов. Гидрохимическая лаборатория Севастопольской биологической станции установила, что для поверхностных вод Черного моря отношение к хлору равно 1.807, т. е. величине, ничтожно отличающейся от вычисленной по уравнению Кнюдсена (1.808). Вследствие этого можно сделать вывод об «идентичности в основных чертах вод Черного моря и океана, что в первую очередь указывает на океаническое происхождение солевой массы Черного моря». Когда Л. А. Лебединцев в 1902 г. дал коэффициент 1.656, была, очевидно, допущена какая-то случайная грубая ошибка.

Болгарский ученый, проф. В. Караогланов (1934), подробно изучивший химический состав воды Черного моря, писал: «Из нашего обзора мы можем заключить, что хотя черноморская вода значительно более разбавлена, чем вода Средиземного моря и океана, по характеру, происхождению и соотношению составных частей,— за малыми исключениями она подобна типичной океанической воде».

В 1924—1927 гг. на Черном море были совершены многочисленные экспедиции Гидрографического управления и Севастопольской биологической станции, в значительной части под руководством Ю. М. Шокальского. В докладе на Международном географическом конгрессе в 1934 г. Шокальский от лица этой экспедиции дал общий обзор гидрологии Черного моря, резюмировав его следующими словами: «Черное море образовано двумя слоями воды, совершенно различными по их происхождению и строению. Верхний слой малой толщины, приблизительно 200 м (в открытом море немного менее, у берегов несколько более), образован морской водой со значительным добавлением пресной воды из рек и от осадков на самую поверхность моря. Нижний слой, примерно 2000 м толщиной, образован водой — плотной и соленой — Средиземного моря, проходящей с течением по дну проливов Дарданеллы и Босфор. Благодаря своей большой плотности эта вода устремляется прямо из Босфора в глубокую впадину Черного моря. Донное течение Босфора, постоянно продвигаясь, вызывает смешивание воды моря с водой глубоких слоев, которая делается менее плотной и поднимается, постоянно выталкиваемая снизу... Описанные выше условия являются причиной того, что все поверхности изотермобат, изогалин и прочие приподнимаются в середине моря и опускаются по направлению к берегам. Они слегка выпуклы кверху».

Этот короткий абзац из речи одного их крупнейших знатоков океанографии и руководителя исследований Черного моря ясно показывает неудовлетворительность укоренившихся представлений о строении Черного моря. В самом деле, какое мы имели основание считать верхний и нижний слои совершенно различными по происхождению? Чтобы получить глубинную воду с соленостью около 22‰, нужно взять 60% мраморноморской воды и 40% пресной, а чтобы получить поверхностную воду с соленостью 18 ‰, нужно взять 50% мраморноморской и 50% пресной. В глубинных слоях течение некоторых гидрохимических и биологических процессов отличается от такового в поверхностных слоях из-за отсутствия кислорода, но по происхождению эти слои являются производ-

ными одних и тех же начал, лишь с небольшими колебаниями в пропорциях смешения океанической и пресной вод. Откуда известно, что босфорская вода устремляется прямо в глубокую впадину Черного моря? Этого никто никогда не обнаружил. Далее непонятно, каким образом изоповерхности могут подняться выпуклостью, будучи подпираемы более соленой водой из глубокой впадины. Такую статическую картину можно представить себе только в отношении жесткой системы, а для жидкости она представляет явный нонсенс. Понятно, что при всяком подпирании снизу вода будет растекаться таким образом, что поверхности будут оставаться горизонтальными, если говорить только об этой причине или если не представлять себе внедрение тяжелых вод как бурную катастрофу, которая вызовет вспучивание моря. Наконец, хорошо известно, что понижение изоповерхностей в Черном море происходит не только у берегов, но и в средней части моря, где оно находится в явном противоречии с «вспучиванием» моря из глубины, которое должно было бы прийтись как раз на фактически имеющиеся понижения. Ясно, что наклон изоповерхностей должен иметь какую-то динамическую, а не статическую причину.

Известно, что заслуга открытия выпуклости изоповерхностей в Черном море принадлежит Н. М. Книповичу, распознавшему это явление еще до начала своих экспедиций в Черном море в 1923 г. путем анализа гидрологических данных Черноморской экспедиции 1890—1891 гг. Он же дал единственно правильное объяснение этому явлению, связав его с системой течений в Черном море и предсказав заранее, что в Черном море имеются две большие области выпуклых изоповерхностей — восточная и западная и что понижение поверхностей имеется также в средней части моря между двумя халистическими областями, что впоследствии блестяще подтвердилось. Это открытие имело принципиальное значение в познании Черного моря и явилось первоклассным вкладом в его изучение после 30-летнего застоя. Оно дало огромный толчок аналитической работе гидрологов, подчеркнув роль системы течений Черного моря не только в частном распределении поверхностных элементов, но и во всей динамике его водной массы, а также всех зависящих от нее геологических и биологических явлений. Однако проблема динамики водной массы Черного моря в целом надолго осталась вне внимания океанографии. Н. М. Книпович говорил в своей сводной работе (1933): «Я полагаю, что, принимая указанную схему течений,— а не принимать ее нет основания,— мы приходим к признанию неизбежного прижатия кругового течения к окраинам области больших глубин под влиянием вращения земного шара. Масса воды течения, в которое поступает и вода рек и значительно опресненная вода из Азовского моря, должна оттеснять до известной степени сравнительно тяжелые воды глубоких слоев (в которых в значительном количестве содержится и сероводород). При таких условиях действие вертикальной циркуляции должно поблизости от окраин больших глубин простираться на большую глубину, более глубокие слои должны вентилироваться, и глубже должна лежать граница животной жизни».

Н. М. Книпович в 1930 г. писал о причинах проникновения кислорода ниже глубины термической конвекции: «Изучая вертикальное распределение кислорода в воде Черного моря... мы констатируем прежде всего, что мощность слоя, в пределах которого может происходить вертикальная циркуляция, гораздо меньше мощности слоя, в котором вообще наблюдается кислород, иногда раза в $1^1/_2$, иногда в 2 и более. В общем вер-

тикальное распределение кислорода представляется в таком виде: глубже слоя с содержанием кислорода не менее 5 см количество его, как правило, сначала быстро понижается, затем процесс этот протекает сравнительно медленно.

«Вертикальная циркуляция может быть в Черном море непосредственной причиной передачи кислорода лишь до некоторой, сравнительно небольшой глубины. Дальнейшая передача его в более глубокие слои должна обусловливаться действием других факторов». «Что касается передачи кислорода в глубокие слои, лежащие за пределами непосредственного действия вертикальной циркуляции из верхних слоев, обильно снабжаемых этим газом, с одной стороны, из атмосферы, с другой — благодаря выделению кислорода хлорофиллоносными растениями, то в этом процессе играет роль целый ряд факторов. Некоторую роль может играть при этом постепенная передача кислорода путем диффузии. Некоторое значение может иметь далее опускание в глубокие слои твердых и полужидких частиц различного происхождения — частиц детрита растительного и животного происхождения, разного рода остатков отбросов организмов, частиц пыли, падающих из атмосферы. Далее следует отметить возможность перемешивания воды разных слоев под влиянием сейш, течений разного рода. Наконец, представляется едва ли подлежащим сомнению, что важное значение могут иметь вертикальные колебания глубоких слоев, «внутренние волны», действие которых может простираться на большие глубины. Эти явления, констатированные Ф. Нансеном еще в девяностых годах прошлого века и многократно описанные позднее, в Черном море еще не констатированы, но представляется весьма вероятным, что они имеют место и здесь». «Вертикальные колебания сопровождаются, естественно, и перемещением частиц воды в горизонтальном направлении и должны содействовать перемешиванию воды разных слоев, а вместе с тем и передаче в глубину различных гидрологических изменений, в том числе и передаче кислорода».

В. Караогланов (1934) говорит: «Известно, что количество H_2S в Черном море в глубинах наибольшее, но уменьшается и исчезает по направлению к поверхности. Этот факт может быть объяснен только предположением, что кислород проникает в глубины Черного моря, но его количество здесь делается меньше, так как он окисляет H_2S. Таким образом, по этому представлению, уменьшение количества кислорода в глубине не есть причина образования сероводорода, а, напротив, следствие присутствия сероводорода в Черном море».

Вопрос о взаимодействии глубинных слоев океана, различных по плотностям, в настоящее время рассматривается несколько иначе чем в «законе несмешивания», установленном Томсоном и Карпентером в 1868г. Правда, и в недавнее время Ле Дануа сделал попытку довести его до крайности, объявив глубинные воды океана своего рода древними геологическими отложениями, что вызвало в нашей литературе резкую и справедливую отповедь со стороны Н. М. Книповича. Однако последователи «закона несмешивания» еще существуют. Известный океанограф С. Валло (Vallaux), автор «Общей географии морей» (1933), в специальной статье рассматривает недавно появившуюся теорию Тенайля (Tenaille), который полагает, что поверхностные и глубинные воды не только не смешиваются, но отделены одни от других основательной коллоидной пеленой, образующейся от разложения отмирающих планктонных организмов. Полнейшая неосновательность подобных фантазий ясна каждому гидробиологу, знающему, что

продукты распада организмов отнюдь не задерживаются в слое скачка и что наличие растворенного кислорода в глубинных слоях, несмотря на потребление его животными и окисляющимися веществами, можно объяснить только продолжающимся поступлением его из верхних слоев или с глубинными течениями, где-то зачинающимися у поверхности. Валло подчеркивает, что пограничные слои, которые на диаграммах изображаются в виде линий, в действительности оказываются слоями, имеющими 50—100 м толщины, в каковых пределах, очевидно, и протекают процессы перемешивания, на что обращает внимание А. Дефан (Defant). Валло указывает следующие физические факторы, вызывающие внутреннее перемешивание: диффузия, силы, вызываемые приливо-отливными движениями, воздействие неровностей дна, эруптивные и сейсмические воздействия. Лунно-солнечное притяжение вызывает образование приливо-отливных волн не только на поверхности моря, но и во всех внутренних переходных слоях с увеличенным градиентом плотности. Кроме того, внутренние волны образуются на плоскостях соприкосновения взаимно смешивающихся масс, а также и в виде непосредственного отражения поверхностного волнения. Во всех новейших руководствах по океанографии внутренним волнам придается большое значение в процессах глубинного перемешивания. Можно с уверенностью считать, что Н. М. Книпович был прав, объяснив образование довольно мощного переходного слоя ниже допустимой глубины термической конвекции именно перемешиванием внутренними волнами и связанными с ними турбулентными движениями. Нам кажется, что имеющиеся отдельные наблюдения в Черном море, при которых обнаружены крайне резкие градиенты температуры в слое скачка, относятся именно к действию внутренних волн: точка наблюдения пришлась на месте максимального поднятия большой внутренней волны.

Явление внутренних волн в Черном море впервые конкретно подметил В. В. Шулейкин во время экспедиции 1932 г. Материалы этих наблюдений были обработаны Б. А. Шляминым (1938), который нашел, что в данном случае имели место внутренние волны с амплитудами 40 и 100 м и периодами 6 и 13 часов. Очевидно, такие крупные волны сравнительно легко могут быть подмечены при гидрологических разрезах. Но, несомненно, постоянно образуются волны меньших величин, которые могут быть обнаружены только при неподвижной стоянке корабля, а не во время разреза или дрейфа. Такие волны в Черном море, помимо всех прочих причин, должны, вероятно, стимулироваться и приливно-отливными силами, недостаточными, как известно, чтобы вызвать заметную волну на поверхности Черного моря, но более действенными на границах внутренних слоев с малыми различиями плотностей. Вероятно, не малую роль в возбуждении колебаний водных масс Черного моря играют сейсмические явления, достаточно частые и имеющие, как известно, центры своих действий именно у дна Черного моря.

О взаимоотношении верхнего и нижнего слоев Н. М. Книпович высказывался так:

«Масса воды Черного моря распадается на 1) верхний, сравнительно тонкий слой, в пределах которого существуют вертикальная циркуляция, кислород, сравнительно богатая животная жизнь и жизнь растений (помимо анаэробных бактерий), в том числе и тех, жизнедеятельность которых сопровождается на свету образованием органических веществ из неорганических, с поглощением углекислоты и выделением кислорода, отсутствуют сколько-нибудь значительные количества сероводорода, происходят более или менее значительные колебания гидрологических условий и про-

текают окислительные процессы; 2) следующий за ним промежуточный слой — с промежуточными гидрологическими и биологическими условиями и 3) более мощный глубокий слой, составляющий бо́льшую часть всей массы воды Черного моря, который характеризуется особенностями, противоположными верхнему слою... О резкой, вполне определенной границе между зонами окислительной и восстановительной не может быть и речи: существует, как указано выше, и значительный промежуточный слой, где есть и небольшое количество кислорода, и небольшое количество сероводорода... Полное соответствие между распределением главных течений, с одной стороны, и общей формой нижней границы животной жизни и верхней границы сероводородной области, а также распределением в глубоких слоях гидрологических элементов—с другой, объясняются причинной связью между ними, а именно тем, что роль причины играет система течений. Несколько опресненная вода течений оттесняет воду более соленых глубоких слоев и вызывает опускание границы животной жизни, границы сероводорода и «изоповерхностей» разного рода. Отгоны и нагоны воды верхних слоев у берегов под влиянием ветров не играют при этом существенной роли. Но очень важную роль ветры играют как один из главных факторов в создании самой системы течений. Другими факторами являются приток воды в северной части моря и отток через Босфор, а также вращение земли».

В этих строках намечена программа будущих исследований, поиски единства и связи явлений в казавшихся до этого противоположными и раздельными двух областях Черного моря. Они оказались связанными друг с другом и с внешней средой совокупной системой движения.

В другом месте своей книги Н. М. Книпович говорит: «Факторами, содействующими возврату веществ в верхние слои, являются здесь медленно действующие процессы общего поднятия воды глубоких слоев вследствие того, что новые массы соленой воды босфорского течения наполняют наибольшие глубины моря, между тем как часть воды верхних слоев испаряется, часть вытекает через Босфор». Последняя мысль была высказана и ранее у других авторов, но суть ее непонятна. Если слой глубинных вод делается толще по причине притока вглубь новых порций соленой воды, то это может вызвать при определенных условиях утончение верхнего слоя, т. е. повышение уровня промежуточных слоев при одновременном сливании верхнего слоя через Босфор. Но почему это может способствовать смешению промежуточных слоев, не объяснимо без принятия дополнительных предпосылок.

В. Н. Никитин в 1930 г. писал по вопросу о строении водной массы Черного моря так: «Профессор Н. М. Книпович думает, что такое положение изоповерхностей есть результат влияния двух кругообразных течений в западной и восточной половинах моря, которые текут в направлении против часовой стрелки. Но мы того мнения, что в зоне моря, лежащей близ берега, где наблюдается опускание изоксиген и нижней границы планктона, наряду с возможным действием предполагаемых течений значительную роль играют сгоны и нагоны воды как фактор, который вызывает смешение воды и тем создает более глубокое проникновение кислорода, чем в центральных частях моря. Но мы должны заметить, что ни одно из высказанных предположений не объясняет наблюдаемого опу-

скания изолиний содержания солей и сероводорода на глубины 500 — 1000 м, так как действие рассматриваемых факторов едва ли охватывает такие глубокие слои».

Выражаясь столь ограничительно в отношении действия течений, В. Н. Никитин в последней фразе высказывает очень важную мысль. Действительно, смешение слоев при сгонно-нагонных явлениях у берегов не может проникнуть на такие большие глубины, к тому же отстоящие достаточно далеко от берега. В отношении воздействия течений вопрос по существу остался непроанализированным, тем более что понижение изоповерхностей происходит не только у берегов, но и на пространстве между южным берегом Крыма и Анатолией, а также на протяжении от Инеболи к Туапсе, на основании чего Е. Ф. Скворцов и предположил в этом направлении наличие струи течения. В. Н. Никитин объясняет понижение границы планктона в этой полосе именно действием течения, т. е. по существу признает в данном случае верной мысль Н. М. Книповича.

А. Д. Архангельский и Н. М. Страхов (1938) свои представления о строении Черного моря высказывают в следующих словах:

«Избыток опресненной воды сливается через Босфорский пролив в Средиземное море, а навстречу ему, по дну пролива, идет из Мраморного моря поток более соленой воды (24‰), переливающийся в черноморскую котловину. В силу своей большой плотности вода эта опускается вниз и сосредоточивается в глубоких частях котловины. Таким образом, в Черном море возникает своеобразное слоистое расположение воды разной солености: сверху незначительный слой сильно опресненной и более легкой воды, внизу — более мощный слой более соленой и более плотной воды. Описанное расслоение воды имеет длинный ряд чрезвычайно важных последствий, определяющих весь гидрологический режим бассейна. Непосредственным результатом его является прежде всего резкое сокращение вертикальной циркуляции воды. Как показывают наблюдения и расчеты, разность плотностей на поверхности и на глубине 200 м настолько велика, что поверхностная вода при охлаждении в зимнее время не может достигать плотности, наблюдаемой на глубине 200 м. А это значит, что вертикальная циркуляция (в открытых частях моря) может итти лишь немногим ниже 150 м. Все, что ниже, находится в состоянии покоя и связано с верхним слоем только через посредство медленно протекающих диффузионных токов. Но ведь вертикальная циркуляция является главнейшим фактором, который приносит к глубинным частям бассейна кислород. При отсутствии циркуляции кислород, естественно, не поступает на дно, и ниже 150—200 м создаются условия среды не окислительной, а восстановительной со всеми вытекающими отсюда последствиями.

«Таким образом, опреснение сверху и приток соленой воды снизу ведут к тому, что в Черноморском бассейне возникают две среды или два мира, одновременно существующие, но совершенно различные по гидрологическому режиму. Вверху — среда перемешиваемая, снабжаемая кислородом, и, следовательно, по свойствам своим более или менее резко окислительная. Внизу — среда, куда вертикальные токи сверху не доходят, где возможны лишь горизонтальные перемещения, где кислород отсутствует и условия резко восстановительные.

«Совершенно своеобразные условия царят в Черноморском бассейне на глубинах свыше 150—200 м в области, которую мы называли выше

восстановительной средой и которая обнимает главную массу черноморской воды (85—90%). Характерную черту этих глубоких частей бассейна составляет то, что вертикальная циркуляция сюда уже не доходит и, таким образом, вода находится в состоянии покоя, застоя, которое нарушается лишь чрезвычайно медленно идущими процессами диффузии и растекания по дну приливающейся из Босфора более тяжелой и соленой воды Мраморного моря».

О фауне и общих условиях древнечерноморского бассейна Архангельский и Страхов говорят:

«Фауна, напоминающая до известной степени описанную смесь каспийских и средиземноморских форм, встречается в настоящее время в устьевых частях некоторых лиманов одесского побережья. Если, однако, даже предположить, что новоевксинские виды попали в рассматриваемый горизонт уже в мертвом состоянии и образуют лишь танатоценоз, то при просмотре приведенного списка все же поражают однообразие, бедность и специфический отбор черноморских форм. Столь бедные биоценозы встречаются в современном Черном море лишь перед устьями лиманов, а также местами в Тендровском и Егорлыкском заливах. Все это указывает, что в эпоху образования нижнего горизонта Черное море в районе развития современного фазеолинового биоценоза имело и меньшую глубину и меньшую соленость.

«Соленость древнечерноморского бассейна в начале его существования была значительно меньше современной и в дальнейшем постепенно увеличивалась. В отношении годового режима древнее Черное море мало отличалось от современного.

«Если не подлежит сомнению, что по числу видов современная черноморская фауна богаче, разнообразнее древнечерноморской, то мы имеем много оснований думать, что по числу особей древнечерноморская фауна значительно превосходила современную. Особенное обилие донного населения в древнем Черном море сказывается прежде всего в том, что количество раковин в древнем мидиевом иле значительно превосходит количество их в современных отложениях. В полном соответствии с этим стоит исключительное обилие эмбриональных планктонных раковин моллюсков в микрослоистой глине и черном иле глубокого моря, которые в этом отношении очень резко отличаются от современных глубоководных осадков. Исследования Д. М. Раузер-Черноусовой (по определению содержания хлорофилла в осадках) показывают, что древнее Черное море было значительно богаче и растениями, особенно фитопланктоном.

«Обилие фитопланктона выражается, кроме того, в существовании трепелевых прослоев у берегов юго-западного Крыма, которые составлены главным образом из остатков планктонных форм (*Coscinodiscus*). Древнее Черное море по богатству планктоном, повидимому, приближалось к Азовскому, с которым оно имело много общего и по относительно малой солености воды».

О процессе превращения соленого Карангатского моря в опресненное Новоевксинское Архангельский и Страхов говорят так: «Превращение Карангатского моря в проточное озеро должно было вызвать первоначально опреснение верхних слоев воды, но со временем под влиянием диффузии и течений, система которых в Новоевксинском бассейне должна была довольно значительно отличаться от современной, оп-

реснение могло захватить и глубокие части водной массы».

Последняя фраза показывает, что, признавая очевидную необходимость допущения глубокого перемешивания в прошлые времена, геологи в то же время как бы ищут оправдания перед гидрологами, ссылаясь на то, что система течений раньше была другая, как будто современная система течений заведомо мешает перемешиванию с глубокими слоями.

Далее эти авторы пишут:

«Рассматривая возможные причины опреснения бассейна в начале Новоевксинской эпохи, мы пришли к заключению, что явление это могло зависеть от прекращения нижнего босфорского течения и что последнее могло замереть или под влиянием резкого увеличения притока пресных вод с суши, или же вследствие значительного поднятия дна в области Дарданельского и Босфорского проливов, которое перед этим, несомненно, имело место.

«Вполне естественно думать, что обратный процесс осолонения явился следствием возобновления нижних течений в проливах, а это могло произойти под влиянием или уменьшения притока пресных вод или углубления проливов вследствие опускания дна. В предыдущем мы видели, что в конце новоевксинского времени произошли значительные опускания дна бассейна, вызывавшие затопление болотистой суши в северо-западном углу моря и образование лиманов. При наличии этого факта едва ли можно сомневаться, что осолонение явилось следствием этих опусканий. Если признать этот вывод правильным, то естественно будет и опреснение новоевксинского времени связывать также с поднятием дна, а не с климатическими изменениями».

С 1935 г. с рядом докладов и статей, в которых затрагивался вопрос о циркуляции водной массы в Черном море, выступил В. А. Водяницкий, подошедший к этим вопросам со стороны биологической продуктивности Черного моря и режима биогенных веществ в нем.

На основании своих исследований над размножением рыб в открытых водах Черного моря и сделанных при этом нескольких неожиданных открытий, автор пришел к мысли, что установившиеся взгляды на крайнюю бедность открытых вод Черного моря жизнью неверны. Нет нужды в полном объеме касаться этих вопросов, так как они подробно изложены в статье 1941 г. Эта статья была написана в 1936 г., но пролежала в редакции ЗИН четыре года без движения, по независящим от автора причинам. В отношении распределения биогенных веществ автор писал:

«Мы подходим к выводу, что объективная картина содержания соединений азота и фосфора в поверхностных слоях Черного моря такова, что мы должны не только отказаться от распространенного мнения об обедненности этими биогенными веществами поверхностных вод Черного моря, но можем с полным основанием допустить, что имеющееся в настоящее время ненормальное обогащение поверхностных слоев его соединениями азота и фосфора происходит как за счет приноса с суши, так и за счет поступления их из верхних слоев восстановительной зоны. Как химическая база для биологических процессов поверхностные слои Черного моря (его окислительная зона) не могут быть резко противопоставлены глубинным слоям (восстановительной зоне). Поверхностные слои отличаются повышенным содержанием и своеобразным соотношением соединений биогенных элементов, и в этом отношении они теснейшим образом связаны с восстановительной зоной.

«Помимо вертикальной циркуляции, зависящей от периодического охлаждения поверхностных слоев воды и выносящей к поверхности глу-

бинные слои с повышенным содержанием биогенных веществ, имеется еще одно весьма важное обстоятельство, способствующее непрерывному подъему глубинных вод, — обстоятельство, которое до настоящего времени недостаточно принималось во внимание при обсуждении вопроса о круговороте веществ в Черном море, именно — влияние циклонических круговых течений. Известно, что течения в Черном море представляют в общей схеме два круговых течения, имеющих направление против часовой стрелки (циклоническое). Одно из этих круговых течений охватывает западную половину Черного моря, другое — восточную. Струя течения испытывает вращательное движение, которое в случае циклонического течения уводит вглубь внешние части струи, т. е. обращенные к берегу, и поднимает к поверхности внутренние части струи, обращенные к середине моря. В результате мы имеем хорошо известный в настоящее время и впервые описанный для Черного моря Н. М. Книповичем факт поднятия изоповерхностей в халистатических областях моря — явление, подробно изученное в многочисленных экспедициях Гидрологического управления и Севастопольской биологической станции. Куполообразное строение изоповерхностей в Черном море является, таким образом, результатом закономерного вертикального перемещения водных масс, опускающихся на глубины в периферических частях течений и поднимающихся внутри халистатических областей. Вращательное движение теоретически должно захватывать всю толщу воды до самого дна. В настоящее время (согласно устному указанию В. В. Шулейкина) теория еще не дает возможности вычислить реальные величины, характеризующие этот процесс, и указать, с какой скоростью происходит вертикальное перемещение вод. Перемещение водной массы в средних частях моря из глубины к поверхности должно приводить, конечно, к поступлению на поверхность также и повышенных количеств биогенных веществ.

«Таким образом, в этом процессе мы должны видеть некоторый регулятор содержания биогенных веществ в поверхностных слоях, непрерывно противодействующий уводу биогенных веществ в глубины восстановительной зоны. В тех участках моря, где создаются завихрения, направленные антициклонически, мы встречаем обратную картину, т. е. понижение изоповерхностей в области, охваченной таким течением. Здесь должно быть обнаружено, при более глубоком горизонте проникновения кислорода и планктона, пониженное содержание биогенных веществ.

«Большое значение в процессе перемешивания вод в последнее время приписывается так называемому турбулентному перемешиванию. Хотя увеличивающаяся с глубиной плотность воды в Черном море является препятствием для нормального хода процессов этого рода, тем не менее мы должны предполагать, что хотя бы медленный послойный обмен этого рода происходит в водах Черного моря».

Взгляды В. А. Водяницкого, несмотря на то, что они были подкреплены данными гидрологическими, гидрохимическими и биологическими, первоначально были встречены в высшей степени скептически, но, после того как авиаразведка (А. П. Голенченко, А. В. Кротов) подтвердила наличие в открытых водах Черного моря огромных стад хамсы, шпрота и пеламиды, интерес к этому вопросу увеличился, и научные рыбопромысловые организации приступили к планомерным экспедиционным исследованиям в открытых водах Черного моря.

Наиболее существенные результаты этих экспедиций были объеди-

нены в докторской диссертации С. М. Малятского, две главы из которой были опубликованы в 1941 г. Полностью подтверждая основные взгляды В. А. Водяницкого на биологическую продуктивность Черного моря, С. М. Малятский особенно подробно останавливается на закономерностях горизонтального распределения биомассы планктона. На ряде карт (которые являются первыми для Черного моря по данному вопросу) С. М. Малятский устанавливает весьма неравномерное распределение биомассы планктона в части открытого моря против южного берега Крыма и в северо-восточной части моря. Ему удалось показать зависимость этого распространения от течений. Он пишет:

«В области течений вертикальный обмен вызывается явлением турбулентного перемешивания, возникающего всюду, где есть градиенты скоростей. Но морские течения (постоянные) создают большие градиенты скоростей лишь у дна, у берегов и на своих пограничных поверхностях. Такие участки должны быть в Черном море в тех местах, где течения: 1) скользят по свалу континентальной ступени, 2) где они круто меняют свое направление, повинуясь изменению направления береговой линии, и, наконец, 3) там, где встречаются течения различных направлений, т. е. на линиях сходимости. Именно в таких участках следует ожидать наибольшего результата усиленного вертикального перемешивания, и наш материал это подтверждает. Хотя станции наших экспедиций расположены по преимуществу за пределами континентального плато, тем не менее в целом ряде случаев можно видеть, как это количество организмов, незначительное у берегов, увеличивается, примерно, в районе свала и затем вновь уменьшается. Но наибольший интерес представляют богатые области в удаленных от берега частях моря. Одна такая область, постоянно фигурирующая на всех наших картах, расположена к югу от мыса Меганом. Другая богатая область лежит к востоку от меридиана Керченского пролива, в море против Новороссийска и Туапсе. Обе они лежат в таких местах, где происходит соприкосновение различных течений. В обоих случаях имеет место не только значительный градиент скоростей на пограничных поверхностях, но также и соприкосновение вод, различных по своим качествам. В местах стыков разнокачественных вод вертикальная циркуляция должна быть особенно мощной, и, следовательно, вынос в поверхностные слои биогенных элементов с глубин должен протекать наиболее интенсивно.

«В мировом океане подобные места получили название фронтов, и они отличаются особенно высокой биологической продуктивностью.

«В Черном море явление «фронта» гораздо меньше по своему масштабу, однако сущность его остается той же. Гидрологические и гидрохимические материалы, собранные в наших экспедициях, дают достаточное фактическое подтверждение этому. К сожалению, в настоящее время мы не имеем возможности воспользоваться ими в полной мере, так как они находятся еще в обработке.

«Стык разных течений предполагает, как известно, соприкосновение водных масс, различных по своему качеству, по своему происхождению. Для Черного моря проблема водных масс нуждается в дальнейшей всесторонней разработке. Однако совершенно ясно уже сейчас, что распределение водных масс и их взаимодействие, проявляющееся в виде «фронтов», является одним из руководящих факторов распределения жизни в пелагиали Черного моря».

Мы должны обратить особенное внимание на эту весьма важную работу С. М. Малятского, безвременно погибшего инициативного исследо-

вателя Черного моря, тем более, что почти весь тираж его работы погиб. В вышедшей в 1945 г. работе В. Н. Никитина, посвященной распределению биомассы планктона в Черном море, автор приходит к тем же выводам: «В центральных частях моря места повышенной биомассы лежат в областях схождения течений, где усиливается вертикальная циркуляция и подъем биогенных солей в верхние слои моря». Кроме того, Никитин отмечает значение притока вод Азовского моря и материковых вод и сгонно-нагонного перемешивания у берегов.

Приведенный обзор развития взглядов на циркуляцию и баланс вод в Черном море показывает, что хотя в основном господствовали первоначальные представления, установленные И. Б. Шпиндлером и Ф. Ф. Врангелем, но в русской литературе проявлялись и другие тенденции, которые можно резюмировать в следующих положениях:

1. Было установлено наличие промежуточного слоя, лежащего ниже слоя термической конвекции, но обнаруживающего несомненные признаки смешивания поверхностных и глубинных вод, что было предположительно объяснено действием внутренних волн (Н. М. Книпович).

2. Было открыто явление куполообразности изоповерхностей и в основном объяснено перемещением к периферии халистатических областей струй течений под воздействием вращения земного шара (Н. М. Книпович), а у берегов — отчасти сгонно-нагонными процессами (В. Н. Никитин и Е. Ф. Скворцова).

3. Была доказана неправильность господствовавших представлений об обедненности верхних слоев Черного моря питательными солями и общей их бедности жизнью, что было поставлено в связь с необходимостью признания глубокого взаимодействия верхних и нижних слоев (В. А. Водяницкий).

4. Было развито положение, что вращательное движение струй в циклоническом течении должно вызывать вертикальное перемещение слоев кверху в центральных частях халистатических областей и опускание слоев в периферических частях струй течений. Этот процесс должен вызвать движение глубинных слоев и вовлечение вод «восстановительной зоны» в обмен с «окислительной зоной» (В. А. Водяницкий).

5. Была разносторонне подтверждена правильность мнения о наличии значительного населения в открытых водах Черного моря (В. А. Водяницкий, авиаразведка и экспедиции ВНИРО, С. М. Малятский, Н. В. Морозова-Водяницкая).

6. Было установлено неравномерное распределение биомассы планктона в открытых водах Черного моря в зависимости от системы течений (С. М. Малятский, В. Н. Никитин).

Таково было положение к началу Великой Отечественной войны.

В новейшем обзоре физики, химии и биологии океанов Свердруп, Джонсон и Флеминг (Sverdrup, Johnson and Fleming, 1942) обстоятельно рассматривают вопрос о водообмене моря, связанного мелководным проливом с соседним морем и имеющего соленость ниже последнего. Эти высказывания настолько важны, что мы должны привести их полностью.

«Бассейны с притоком через порог. В почти замкнутых бассейнах в более высоких широтах осадки и речной сток превышают испарение. В подобных бассейнах создаются поверхностные слои с низкой соленостью и соответственно низкой плотностью. По причине избытка осадков и притока речных вод здесь должен создаться поверхностный отток относительно опресненной воды, и для поддержания баланса солености здесь должен быть и приток более соленой воды. Обмен водой

с внешним морем мал, так как разница $\bar{S}_u - \bar{S}_i$ велика. Если разница так велика, что отношение $\bar{S}_u : \bar{S}_i$ мало отличается от единицы, то выражение, представленное равенством (IV,6), сводится к

$$T_i = D\frac{\bar{S}_u}{\bar{S}_i}, \quad T_u = D\left(1 + \frac{\bar{S}_u}{\bar{S}_i}\right)^1, \qquad \text{(IV, 7)}$$

где D теперь меньше избытка осадков и речного притока над испарением. При этих условиях приток (соленой воды) составляет только малую часть этого избытка, и отток практически равен избытку.

«В бассейне этого типа оказываются стагнирующие воды, потому что обновление воды в бассейне имеет место только в том случае, если втекающие воды имеют бóльшую соленость, чем воды бассейна. За порогом плотность воды обычно возрастает много быстрее с глубиною, чем по эту сторону порога. Обновление воды в бассейне имеет место, если внешние водные массы настолько повышаются, что вода, которая вытекает через порог, имеет такую высокую соленость, что она опускается ко дну бассейна.

«Скорость обновления глубинных вод в бассейне зависит от степени резкости вертикального градиента плотности на глубине порога. Если этот градиент велик, случайное сильное возмущение наполнит бассейн ниже глубины порога водой высокой солености, и последовательные возмущения могут быть настолько велики или еще больше, чтобы вызвать обновление вод бассейна. В крайнем случае обновление имеет место только при больших катастрофах. В промежутках между такими катастрофами вода бассейна остается стагнирующей, потому что в нижних слоях при устойчивой стратификации вертикальное перемешивание незначительно. Такое перемешивание тем не менее имеет место, и оно, в промежутках между большими катастрофами, уменьшает плотность воды моря настолько, что при новой катастрофе происходит полное обновление вод.

«С другой стороны, если градиент плотности на глубине порога мал, внешняя глубинная вода поступает через порог при любом малом возмущении, и стагнация предупреждается непрерывными вторжениями внешних вод, а также вертикальным перемешиванием, которое более эффективно соответственно малому градиенту плотности.

«Вода, которая опускается от глубины порога, нагревается адиабатически, и вода бассейна имеет поэтому приблизительно постоянную потенциальную температуру. Эффективная глубина порога, т. е. та глубина, от которой потенциальная температура во внешних водах равна таковой в данном бассейне, ниже в среднем, чем действительная глубина порога, и чем меньше градиент плотности во внешних водах, тем больше разница между эффективной и действительной глубиной порога. Большие гради-

---

[1] При постоянных условиях общее количество воды, которое в данный промежуток времени T_i втекает в бассейн, должно быть равно сумме оттока T_u и разности D между осадками плюс речной сток и испарениям за то же время: $T_i = T_u + D$. Вместе с тем количества солей, переносимые притоком и оттоком, должны быть равны. В первом приближении $T_i\, S_i = T_u\, S_u$, где S_i есть средняя соленость притекающих вод и S_u есть средняя соленость вытекающих вод. Отсюда получаем:

$$T_i = D\frac{\bar{S}_u}{\bar{S}_u - \bar{S}_i}, \; T_u = D\frac{\bar{S}_i}{\bar{S}_u - \bar{S}_i}. \qquad \text{(IV,6)}$$

енты плотности, если имеются, всегда находятся вблизи поверхности, и такой бассейн с притоком на глубине порога поэтому имеет стагнирующие воды, если порог мелководен. Черное море, Балтийское море и многочисленные норвежские фиорды дают примеры бассейнов этого типа».

Итак, мы видим, что формально-логическое рассуждение приводит автора к необходимости отрицания возможности вертикального обмена, но научная добросовестность и фактическая очевидность, в виде хотя бы таблицы распределения соленостей, совсем не таких, какие были бы при отсутствии вертикального обмена, заставляет тут же сказать, что вертикальное перемешивание имеет место (но, конечно, в какой-то ограниченной степени).

В той же книге Свердрупа и др. рассматривается вопрос о балансе вод в Черном море и течениях в Босфоре. Здесь мы находим такое же противоречивое суждение. Мы должны привести эту выдержку, хотя и не содержащую новых фактических данных, но выражающую определенное представление крупнейших океанографов о Черном море на основании всего, что им было известно из литературы к 1942 г.

«Водные массы Черного моря совершенно отличаются от таковых собственно Средиземного моря. В Черном море осадки и речной сток превышают испарение, по каковой причине поверхностные слои имеют относительно низкую соленость и соответственно низкую плотность. Вертикальное перемешивание стремится уменьшить плотность глубинных вод, которые поэтому имеют меньшую плотность, чем воды Средиземного моря на тех же глубинах. В результате такого распределения плотности, поверхностные воды Черного моря вытекают через Босфор и через Дарданеллы, а средиземноморская вода втекает по дну. В этих узких проливах происходит интенсивное перемешивание, и соленость втекающих вод поэтому уменьшается от более чем 38.50‰ от входа в Дарданеллы до 35.00—30.00‰, пока донное течение достигнет Черного моря у северного конца Босфора. Точно так же соленость вытекающих вод повышается приблизительно от 16.00‰, когда они вступают в Босфор, до, примерно, 30.00‰, когда они покидают Дарданеллы. Вытекающие и втекающие воды разделены хорошо отличимым переходным слоем, который колеблется вверх и вниз соответственно очертаниям дна. Течения в Босфоре могут быть сравнены с двумя реками, текущими одна поверх другой — по руслу, имеющему ширину около 4 км и глубину от 40 до 90 м.

«Значительные водные массы проходят через Босфор. По измерениям течений и другим наблюдениям А. Мерца и Л. Мёллера (1928), наиболее вероятное количество оттока и притока соответственно 12 600 м³/сек. и 6.100 м³/сек. Разница между притоком и оттоком 6 500 м³/сек. представляет избыток осадков и речного стока над испарением. Осадки и речной сток определяются в 7 600 и 10 400 м³/сек.; соответственно, испарение должно иметь поэтому величину около 11 500 м³/сек., или 354 км³/год. Площадь Черного моря составляет 420 тыс. км², и это количество соответствует испарению в 84 см в год, что согласуется с наблюденными и вычисленными величинами для этой широты.

«Для Черного моря вытекающие и втекающие водные массы — такого же порядка, как разность между осадками плюс речной сток и испарением, в то время как для Средиземного моря собственно притекающие и вытекающие водные массы в несколько раз больше, чем избыток испарения. Отсюда следует, что обновление вод Черного моря есть очень медленный

процесс, потому что в целом обновление осуществляется только водами, втекающими по дну Босфора. Этот приток так мал по сравнению с общим объемом воды в Черном море, что полное обновление вод ниже глубины 30 м (!) может произойти в течение 2500 лет. Для всех практических целей глубокие воды Черного моря являются застойными, как это очевидно из факта, что ниже 200 м вода содержит не кислород, а большие количества сероводорода».

В 1942 и 1943 гг. появился ряд статей Г. Неймана (Neumann) по основным вопросам гидрологии Черного моря. В одной из этих статей — «О строении и глубинной циркуляции Черного моря» (1943) автор подвергает пересмотру существующие взгляды на строение водной массы Черного моря, широко используя опубликованные русские работы и исследуя вопрос как путем общих логических заключений, так и методами математического анализа экспедиционных наблюдений. В основном автор поддерживает взгляды Н. М. Книповича на систему течений в Черном море и ряд других вопросов, но не соглашается по многим частностям с другими авторами, полемизировавшими с Книповичем. Мы не будем вдаваться в эти детали и приведем выдержки, характеризующие основные выводы автора, работы которого, несомненно, потребуют тщательного рассмотрения со стороны специалистов-гидрологов.

«Многократно высказанный взгляд на стагнирующие, неподвижные, глубинные слои в Черном море никоим образом не может считаться твердо обоснованным, и мы увидим, что строение нижней водной массы оказывается далеко не так монотонно, как это принималось до сих пор... Необходимо строго проводить различие между термической вертикальной конвекцией и общей вертикальной циркуляцией. Данная Книповичем нижняя граница «вертикальной циркуляции», которая совпадает с температурным минимумом и содержанием кислорода около 5 $см^3$ в литре, есть в действительности нижняя граница термической вертикальной конвекции... Если бы нижняя часть тропосферы была совершенно неподвижна, тогда снабжение кислородом могло бы происходить только в верхних слоях, именно до глубины действия вертикальной конвекции...

«В отношении снабжения кислородом слоев воды ниже зоны прямой вертикальной конвекции в основном речь может итти только о переносе богатых кислородом верхних водных масс путем обмена. Доставка кислорода путем диффузии или опускающимися частицами разного рода (пыль, твердые и полужидкие органические остатки и т. д.), напротив, играет незначительную роль... Нижняя граница вертикальной циркуляции (обмена) может при известных обстоятельствах близко совпадать с нижней границей движущейся водной массы... Нужно принять, что перенос кислорода в глубину обусловлен преимущественно вертикальным обменом, т. е. зависит от наличия определенных движений водной массы.

«Все пограничные слои обнаруживают характерную выпуклость их поверхностей как следствие устойчивого положения водных масс, двигающихся циклонально в поверхностных слоях.

«Дифференты динамических глубин стандартных значений давления между соседними океанографическими станциями показывают, что почти у всех пар станций имеется глубокий слой, в котором эти дифференты остаются константными или почти константными. Эти глубинные слои располагаются в их совокупности в сомкнутую поверхность, и эта поверхность имеет такую же характерную выпуклость, как упомянутые пограничные слои. Следуя примеру Дефана, примем, что этот пограничный слой в динамическом строении моря представляет динамический нулевой

слой для течения. Это предположение подкрепляется тем, что глубина принимаемого нулевого слоя совпадает с глубиной пограничной поверхности между двумя видами воды.

«После установления динамической нулевой поверхности может быть подсчитана абсолютная топография плоскостей давления. Динамический подсчет привел к замечательному выводу, что преобладающим в верхних слоях воды циклональным течениям противостоят в стратосфере Черного моря антициклонально направленные движения водной массы. На основании имеющихся наблюдений над содержанием соли в глубоких слоях стратосферы могут быть сделаны важные заключения о строении нижних слоев воды.

«Материал наблюдений позволяет показать с большим вероятием, что изостеры в верхних и нижних слоях выпуклы противоположно друг другу. Предположенная схема циркуляции стратосферы хорошо согласовывается с таким ее разделением: скорость антициклонального глубинного течения возрастает вниз от динамической нулевой поверхности примерно до 1000 м глубины, достигает максимума приблизительно на 1000 м и уменьшается ко дну.

«Сам собою возникает вопрос о причинах такого антициклонального движения вод в глубине. Возможное, но, вероятно, не единственное объяснение может быть следующее:

«Представим себе в замкнутом округлом бассейне поверхностную водную массу, разделенную на слои и находящуюся в круговом циклональном движении. Пограничная поверхность между верхней и почти гомогенной нижней водной массой установится наклонно и, именно, она выпятится кверху в середине кругового течения, поскольку верхние слои по отношению к нижним движутся быстрее в заданном направлении.

«Устойчивая стратосфера возможна только тогда, если водная масса тропосферы движется без трения, так как необходимое условие для устойчивого равновесия есть исчезновение переноса воды перпендикулярно к изобарам, т. е. также перпендикулярно к берегу. Иначе обстоит дело, когда движение идет при воздействии трения. Поток течет тогда, понятно, уже не параллельно изобарам, но имеет маленький компонент к глубинному давлению.

«Устанавливается непрерывный перенос воды от периферии к центру кругового потока, и тогда условие, что перенос воды перпендикулярно к берегу исчезает, уже более не соблюдается.

«Следствием этого является постепенное выравнивание давления в верхних слоях воды. Движение оказывается далее неустойчивым (непостоянным). Нарастание давления в середине циклонического течения вызывает такое же увеличение давления в лежащей ниже поверхности стратосферы, и первоначально горизонтальные изобарические поверхности изгибаются посередине кверху. Следствием этого оказывается антициклоническое течение во всей глубинной зоне. Устойчивое равновесие установится только тогда, когда в единой системе тропосфера—стратосфера горизонтальный перенос воды перпендикулярно к берегу сделается равным нулю, и это условие усиливает сопряженные друг с другом системы течений в обеих водных массах.

«Е. Экман (Ekman) в своей основной работе о теории морских течений упоминает особенный случай со слоистыми поверхностными водами и однородными глубинами, к сожалению, подробнее не рассмотренный, но имеющий много сходства с условиями в Черном море. Там сказано: «В других случаях, например, в замкнутом морском бассейне, где мощности те

чений в любом направлении должны быть равны нулю, условия изменяются. В этом случае, очевидно, должно возникнуть глубинное течение, направленное противоположно верхнему течению и скорость которого уменьшается соответственно увеличению глубины моря.

«Вопрос о причине этого глубинного течения в Черном море должен быть далее исчерпывающе исследован на основательном материале наблюдений. Но уже теперь можно утверждать, что при подобном динамическом строении едва ли возможна полная разобщенность между тропосферой и стратосферой, и между ними должен быть известный, хотя и незначительный водообмен. О водообмене между стратосферой и тропосферой морей до настоящего времени вообще мало известно. Экман несколько лет назад высказался об этой проблеме и показал, что перенос воды из стратосферы в тропосферу (и обратно) возможен и тогда, когда в вертикальном направлении удерживаются стационарные слои, или что при таком переносе воды из стратосферы стационарная слоистость водной массы не должна рассматриваться как безусловно нарушаемая».

Работы Неймана,[2] основанные на гидрологической методике анализа, показывают, что в предшествовавших высказываниях гидробиологов, казалось бы противоречащих общепринятым мнениям, заключалась истина, находящая теперь выражение и на языке гидрологов. Эта истина, пробивавшаяся еще в замечательных статьях Н. И. Андрусова, воскресла в дальнейшем в работах Н. М. Книповича и была развита позднее в связи с вопросами продуктивности моря.

Скептицизм Ю. М. Шокальского в отношении наших знаний о течениях в Черном море и предположенной Н. М. Книповичем причинной связи между кольцевыми течениями и выпуклостью изоповерхностей, возможно, объективно коренился в недостаточности конкретного анализа гидрометеорологической первопричины сложения определенной системы поверхностных течений Черного моря и их воздействия на глубинные слои. Если учесть, что барические градиенты в бассейне Черного моря в основном способствуют преобладанию ветров, дующих с берегов в сторону открытого моря и, очевидно, с некоторым уклоном в правую сторону, то суммарный эффект воздействия ветров на поверхностные слои моря выразится в создании преобладающего течения, отклоняющегося еще более вправо и получающего вследствие этого направление не только вдоль, но и по направлению к берегу, т. е. приобретающего характер нагонного те-

[2] Идеи и материалы, излагаемые в статьях Г. Неймана, в значительной степени преемственно связаны не только с опубликованной, но и с неопубликованной русской литературой. Несомненно, в руки Неймана в 1942 г. попали материалы и рукописи Н. И. Чигирина, чему находим прямое указание в статьях Неймана. Так, в статье «Ueber den Aufbau» (стр. 4) приводится со ссылкой на Чигирина таблица потенциальных температур, каковой не имеется ни в одной опубликованной работе Чигирина. В статье «Ueber die Stabilität» даже даются пояснения, каким образом Чигирин производил вычисления, но тоже нет ссылки на какую-либо опубликованную работу Чигирина, хотя приложен обстоятельный список литературы, в том числе и русской. Вместе с тем недавно в одном из Севастопольских учреждений нашлись копии двух неопубликованных статей Чигирина на те же самые темы (о строении водной массы и устойчивости вод), в частности содержащие таблицу, приводимую Нейманом. В этих статьях Чигирин развивает гипотезу В. А. Водяницкого (о внутренней циркуляции вод в Черном море), которая многократно излагалась Водяницким в ряде докладов в 1935—1939 гг. и была отлично известна Чигирину. Таким образом, в конце концов выяснились пути этой своеобразной «преемственности» идей, достигших рук ученого оккупанта. Работа Водяницкого, напечатанная в 1941 г., была сдана в печать еще в 1936 г., о чем сказано в примечании, помещенном по ошибке на стр. 94 вместо 7 (Тр. Зоол. ин-та, 1941). Приоритет русской науки в вопросе внутреннего водообмена в Черном море, таким образом, несомненен.

чения, захватывающего большие пространства моря. Результатом этого непрерывного движения обязательно явится утончение слоя поверхностных вод в центрах двух половин Черного моря и утолщение в их перифериях, т. е. возникновение куполообразности изоповерхностей. Продолжающееся накопление вод в перифериях халистатических областей должно вызвать выравнивающее течение на глубине. Вопрос в том, каким путем пойдет это компенсационное течение — по промежуточному подстилающему слою, как по жидкому грунту, т. е. на глубинах всего лишь около 50 м, или оно захватит более глубокие слои. Теория говорит, что в бассейне с однородной жидкостью и отвесными стенками возвратное течение охватит всю водную массу до дна. В данном случае при увеличивающейся с глубиной плотности и при отлогих стенках возвратные течения затруднены, но все же они не могут отсутствовать. Нам представляется, что при разных конкретных условиях могут сложиться различные схемы взаимодействия слоев, т. е. в некоторых случаях, при слабых нагонных явлениях, возвратное течение пойдет по преимуществу на небольших глубинах, а при сильных и продолжительных нагонных явлениях эффект распространится далеко в глубину, вызвав перемещение к центру значительных глубинных масс. Таким образом, кольцевые течения и куполообразные изоповерхности являются одновременными следствиями преобладающего нагонного характера движения поверхностных слоев.

Говоря в данном случае о нагонных явлениях, мы имеем в виду явления гораздо большего масштаба, чем те, которые при сильных ветрах наблюдаются непосредственно у берега и которые особенно бросаются в глаза при сгоне летом поверхностных слоев и выступании холодных глубинных и которым, как мы видим, приписывалось существенное значение в образовании выпуклости изоповерхностей. Однако можно сказать, что спор об относительной роли сгонно-нагонных явлений и силы вращения земного шара в известной мере теряет свою остроту, так как оба эти фактора объединяются в том представлении, которое изложено выше и которое дает возможность рассматривать основной процесс взаимодействия поверхностных и глубинных слоев как нагонно-сгонное явление, сопутствуемое рядом других видов движений (внутренние волны, турбулентное движение, конвекция). Каждый из исследователей нашел некоторую часть общей картины. Нет нужды во что бы то ни стало отвергать целиком одно и признавать другое. Постараемся использовать и сопоставить все положительное, что имеется в наших знаниях и наблюдениях.

Повидимому, при всех последующих исследованиях Черного моря, которые должны будут гораздо глубже проникнуть в интимные процессы водообмена в море, необходимо будет отказаться от устаревшего представления о стабильности стратосферы и ее односторонней связи с тропосферой.

Все помнят популярное картинное описание Черного моря, якобы состоящего из двух отдельных морей, из которых верхнее, м е л к о в о д н о е, н о б е з д о н н о е, лежит на нижнем, глубоком, но отрезанном от связи с атмосферой и замкнутом в самом себе. Мы теперь хорошо понимаем, что представления И. Б. Шпиндлера и Ф. Ф. Врангеля, желавших, и притом на основе якобы точных физических законов, разорвать водоем как физическое тело на две независимые части со своими совершенно отдельными динамическими характеристиками, есть явный пример довольно наивного механицизма и метафизики, не видевших нужды в обнаружении внутренних связей—процессов, в своих проявлениях дающих даже и противоположные результаты.

Из приведенного исторического обзора мы видим, что развитие наших

знаний о Черном море уже к 1936 г. привело нас к полному изменению представления о строении водной массы Черного моря и обмене веществ в нем, что было подготовлено в основном трудами и идеями Н. М. Книповича. Разработка Г. Нейманом гидрологических материалов по Черному морю, несомненно, представляет значительный вклад, но мы имеем полное основание утверждать, что переворот в представлениях о Черном море произошел в русской науке совершенно самостоятельно. Правильнее даже сказать, что истоки этого нового представления зародились в трудах Н. И. Андрусова одновременно с представлением, получившим в дальнейшем господство, и впоследствии, уже с двадцатых годов, они начали усиленно подкрепляться и развиваться в трудах Н. М. Книповича, но были высказаны с окончательной определенностью гидробиологами Севастопольской биологической станции в тридцатых годах, каковые высказывания и послужили началом для последующей переработки русскими гидрологами материалов по Черному морю с новой точки зрения.

В результате такой переработки наша точка зрения получила полное подкрепление. В изданном в 1946 году сборнике «Памяти Ю. М. Шокальского», в статье «Черноморская океанографическая экспедиция 1923—1935 гг.», наши недавние оппоненты пишут:

«От прежних представлений о строении водной массы Черного моря, заключающихся в том, что Черное море рассматривалось состоящим из двух резко различных по своим гидрологическим характеристикам областей — верхней до 200 м глубины, охваченной циркуляцией, и нижней, лишенной всякого движения вод, застойной глубинной области, от 200 м до дна моря, теперь приходится отказываться. Процессы турбулентного перемешивания в Черном море, по новым данным, распространяются до глубин не менее 1000 м, и, следовательно, поверхностные слои моря находятся в обмене с гораздо большей массой глубинных вод».

Тот же автор за год до составления этого отчета писал: «Вследствие того, что в открытом море, в слоях ниже 50—75 м, высокая положительная вертикальная устойчивость вод обусловлена соленостью, а изменения солености в этих слоях от сезона к сезону и от года к году незначительны, здесь создается постоянный слой большой положительной устойчивости, являющейся препятствием для распространения конвекционного перемешивания в более глубокие слои. Имеющие место в верхних слоях Черного моря периодические ежегодные понижения температуры разрушают только возникающий в летнее время на глубинах 15—25 м устойчивый слой термического происхождения, а на нижний устойчивый слой изменения температуры практически не оказывают влияния. Наличие этого второго слоя максимальной устойчивости, обусловленного соответствующей стратификацией вод по солености, является одной из основных особенностей строения водной массы Черного моря и главным фактором, затрудняющим обмен между глубинными водами и поверхностью моря».

Это была лебединая песня «теории несмешивания», которая уже не воскреснет. Новое представление о Черном море и в среде русской науки создавалось в борьбе противоположных взглядов.

Не рискуя больше быть снова заподозренными в беспочвенном фантазировании, мы можем позволить себе сделать попытку представить основной водообмен в Черном море и конкретный ход истории его солевого режима. Известно, что в глубинах Черного моря соленость воды превышает $22^0/_{00}$, а по направлению к поверхности она постепенно уменьшается, снижаясь на самой поверхности до $18^0/_{00}$ и даже ниже. Такое аномальное распреде-

ление солености обычно приписывается осолоняющему действию нижнего босфорского течения за какой-то длительный период. Весьма любопытно, что именно указанное распределение солености Иллиот и Ильгаз считают доказательством обратного положения, а именно, что вода Мраморного моря не вливается в Черное. По их мнению, иначе в глубинах Черного моря имелась бы резкая стратификация солености. Это противоречие явилось неспроста. И в нашей литературе имеются два противоположных толкования, к удивлению — мирно уживающихся. Действительно, в гидрологической литературе мы найдем доказательства того, что поверхностные воды Черного моря при зимнем охлаждении могут в результате вертикальной конвекции проникнуть лишь до глубины в среднем 150 м, где они встречают слои, уже настолько более соленые и потому более плотные, что смешение их делается невозможным. Именно эта зона вертикальной конвекции и является зоной жизни, «окислительной зоной», в противоположность «восстановительной зоне» с ее сероводородными процессами. Наряду с этим в геологической литературе мы встречаем столько же несомненных доказательств того, что соленость Черного моря и предшествовавших ему бассейнов неоднократно менялась именно под воздействием притока мраморноморской воды, и осолонение распространялось и на верхние слои, вызывая смены фауны даже в прибрежном поясе. В настоящий период жизни Черного моря мы имеем в поверхностных слоях соленость $18^0/_{00}$, которой не было в Новоевксинском бассейне. Очевидно, геологи должны признавать, что осолонение глубин в несколько смягченной форме достигает поверхностных слоев, т. е. имеет место несколько замедленное вертикальное перемешивание мраморноморской воды с поверхностной черноморской. Если бы этого не было и если бы мы признали, что избыточная пресная вода, т. е. 360 км³ в нашем примере (не будем даже брать величину 1000 км³), смешивается при вертикальной циркуляции только с верхним слоем воды в 150 м, который имеет объем, примерно, 60—70 тыс. км³, то соленость поверхностного слоя Черного моря должна была бы ежегодно уменьшаться более чем на $0.1^0/_{00}$, что представляет явную нелепость. В этом случае за последние 50—60 лет, когда ведутся на Черном море детальные наблюдения, соленость поверхностных вод понизилась бы на $6^0/_{00}$, между тем она остается на уровне $18^0/_{00}$. Отсюда можно сделать только два вывода: или в Черном море нет никакого избытка в приходе пресных вод, или происходит глубокое перемешивание при постепенном поднятии со дна более соленых слоев. Мы рискуем сделать попытку выдвинуть рабочую гипотезу для характеристики размеров вертикального водообмена в Черном море.

Допустим, что мы имеем в Черном море более или менее длительное устойчивое состояние в вертикальном распределении соленостей, и пусть оно будет таково, как в настоящее время, т. е. от $18^0/_{00}$ на поверхности до $22^0/_{00}$ в глубинах.

Предположим, что в Черном море имеется ежегодный избыток в 500 км³ пресной воды, которая смешивается в поверхностных слоях Черного моря, а соответственное количество воды с соленостью $18^0/_{00}$ уходит через Босфор. Чтобы литр пресной воды превратить в воду с соленостью $18^0/_{00}$, его, очевидно, нужно смешать с таким количеством более соленой воды, чтобы в смеси на каждый литр пришлось 18 г солей. Гидрологи считают, что вертикальная циркуляция под воздействием зимних охлаждений достигает в Черном море в среднем глубины 150 м. В этом слое от поверхности до 150 м соленость возрастает от 18 до $20—21^0/_{00}$, и далее вглубь возрастание солености идет значительно более медленно. Предположим,

что под воздействием какой-то иной причины, а не термической конвекции соленые воды глубоких слоев в зоне соприкосновения со слоями термической конвекции имеют возможность медленного смешивания с верхними слоями. Представим себе, что сверху поступают пресные воды, которые, перемешиваясь до некоторой глубины под влиянием волнений, в холодный период года вступают в вертикальную конвекцию, захватывающую слой в среднем до 150 м. Но для того, чтобы зона конвекции не оказалась опресненной, необходимо, очевидно, чтобы какое-то количество солей примешалось из слоев, лежащих ниже зоны термической конвекции. Какое же количество воды при солености $21^0/_{00}$ требуется, чтобы при смешении с пресной водой получить соленость $18^0/_{00}$? Очевидно (из простого расчета), шесть объемов. Следовательно, для удержания солености поверхностных вод мы должны допустить, что на 500 км³ излишка пресной воды поднимаются из глубины и смешиваются с поверхностными водами 3000 км³ воды с соленостью $21^0/_{00}$.

Под влиянием каких причин и где происходят эти подъем и смешение? По нашему представлению, более соленые глубинные воды, медленно поднимаясь в средних частях халистатических областей, винтообразно перемещаются к внешним сторонам струй и начинают опускаться, вовлекая в свое движение поверхностные воды и неизбежно частично с ними смешиваясь.

Итак, мы предполагаем, что зонами поднятия глубинных вод являются средние части двух основных халистатических областей. Площадь этих областей составляет, примерно, треть общей поверхности Черного моря, т. е. около 100 тыс. км². На этой площади должно ежегодно произойти поднятие 3000 км³ глубинной воды. Толщина слоя, вовлекаемого ежегодно в этот процесс, на площади поднятия должна составлять около 30 м, а на передвижение такого слоя от дна до поверхности потребовалось бы 70 лет. В противном случае поверхностные слои должны непрерывно опресняться, а на горизонте раздела двух зон должен быть резкий скачок солености. Подобное резкое разграничение, вероятно, возможно лишь в малых водоемах, как знаменитое озеро Могильное; если же водоем достаточно велик, чтобы в нем сложилась система течений и сказывалась сила вращения земного шара, подобное резкое разграничение слоев невозможно. Может быть поэтому и не удается найти в Черном море гипотетическую «пленку Егунова», т. е. пограничную пленку бактерий, легко обнаруживающуюся в экспериментальных условиях в сосудах и обнаруженную также в озере Могильном.

Если мы будем держаться условного примера и считать, что в Черное море вливалось по 200 км³ мраморноморской воды, но допустим, что эти воды, как обычно излагается в литературе, растекались по дну Черного моря, поднимая над собой менее соленые воды, то нетрудно вычислить, что в этом случае мраморноморская вода достигнет поверхностных слоев только через 2500 лет, притом сохраняя свою соленость, т. е. получилась бы картина совсем не такая, как наблюдается в действительности, очевидно по причине постоянного и более быстрого смешения притекающих мраморноморских вод с основной массой вод моря.

Если распространение соленых вод снизу зависит не только от накопления этих вод в глубине, но и от активного процесса перемешивания, то для передвижения вод снизу до поверхности потребуется не 2500 лет, а меньший срок, определить который ориентировочно мы можем еще одним способом следующим образом. Если в контактное перемешивание с поверхностными слоями ежегодно вступает 3000 км³ нижних вод, то

при объеме нижних вод Черного моря, равном 400 тыс. км³, процесс этот дойдет до поверхности через 400 тыс. : 3000, т. е. через 130 лет. Отсюда отнюдь нельзя сделать вывод, что запасы сероводорода и других веществ в глубинах Черного моря в настоящее время возобновляются именно каждые 100 или 130 лет. Во-первых, перемешивание с глубиной замедляется, а кроме того, накопление сероводорода и биогенных веществ в глубине моря зависит от опускания органических частиц и трупов и протекает, преодолевая слабые движения воды. Поэтому, поскольку в Черном море нет нормальной вертикальной циркуляции, процесс проникновения вниз разлагающихся органических предметов и накопление в глубинах продуктов различных химических процессов может итти быстрее, чем направленный вверх процесс переноса с водой накапливающихся веществ. Дефицит кислорода в нижних слоях окислительной зоны до стыка с сероводородом мог бы послужить отправным пунктом для вычисления количества ежегодно поднимающегося снизу сероводорода, а вместе с тем самого водного слоя, вступающего в контактное перемешивание с вертикальными слоями после ежегодной вертикальной циркуляции.

Итак, мы не можем согласиться с мнением Иллиота и Ильгаза, которые считают, что отсутствие резкой солевой стратификации в Черном море доказывает отсутствие притока мраморноморских вод не только в настоящем, но и в прошлом. Думать так—значит игнорировать геологические и палеонтологические данные об истории Черного моря. Мы вынуждены признать наличие смешивания двух водных масс и искать для этого процесса удовлетворительное объяснение. Путем целеустремленных и правильно поставленных детальных наблюдений нужно найти способы выяснения интимных сторон этих процессов, которые до сих пор при общих гидрологических исследованиях ускользали от внимания. Если гидрологи были правы с точки зрения практической гидрологии, принимая стабильность глубинных водных масс в Черном море, то они, повидимому, не правы с точки зрения исторического хода формирования этих масс и даже принципиально, в отношении их основной динамики.

Хотя во многих книгах и работах имеются основные данные о распределении в глубинах Черного моря солености и температуры, т. е. факторов, определяющих плотность и устойчивость вод, ниже мы приводим таблицу, содержащую средние значения действительной температуры, солености, потенциальной температуры, удельного объема и устойчивости

Таблица 1

Средние величины гидрологических элементов для глубинных вод Черного моря

Глубина, м	Действительная $t°$	Потенциальная $t°$	Соленость, S ‰	Удельный объем, V_t	Устойчивость, $E \cdot 10^4$
200	8.60	8.67	21.33	0.98374	—
300	8.81	8.78	21.66	351	+ 241
500	8.87	8.82	21.95	329	+ 109
750	8.91	8.84	22.13	316	+ 55
1 000	8.96	8.86	22.20	313	+ 20
1 250	9.01	8 89	22.23	310	+ 8
1 500	9.04	8.89	22.25	309	+ 6
1 750	9.08	8.90	22.26	309	+ 2
2 000	9.11	8.90	22.27	308	+ 2

для глубин от 200 до 2000 м. Основные данные получены во время экспедиции зимой 1935 г., а производные величины вычислены сотрудниками Севастопольской биологической станции и взяты нами из архивных материалов Севастопольской морской обсерватории.

Из этой таблицы, а также из диаграммы (рис. 1), взятой из того же источника и выражающей соотношение температуры и солености на глубинах от 75 до 2000 м, можно сделать некоторые выводы. Совершенно очевидно, что характер изменения гидрологических величин несколько разнится до глубины около 1000 м и ниже этой глубины. Глубинные воды гораздо более однородны по солености и температуре, почти не отличаются по удельному объему и имеют весьма малую устойчивость. В то же время верхний слой, до 800 м, обнаруживает явные признаки различной степени интенсивности процессов смешения с поверхностными водами, причем градиенты температуры и солености с глубиной уплотняются, после чего от глубины 800 м выявляется довольно резкий перелом к почти однородной среде.

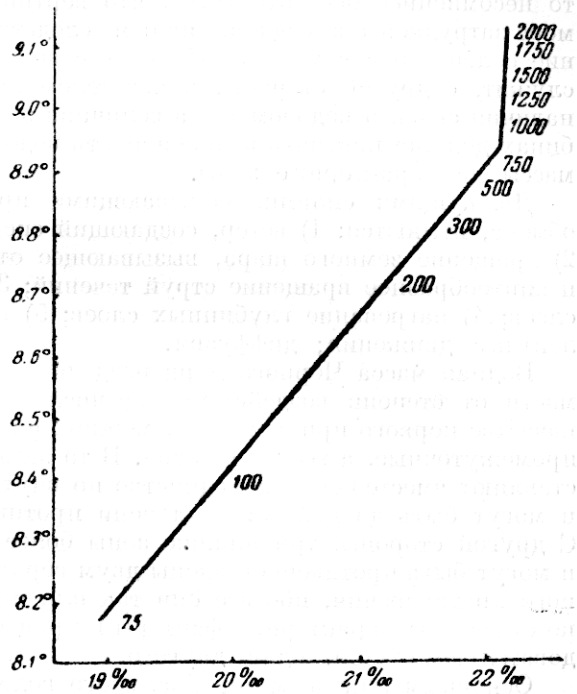

Рис. 1. Температура и соленость на глубинах Черного моря от 75 до 2000 м

Из этого можно сделать вывод, что нижний слой формируется из смешения мраморноморских и поверхностных вод в процессе проникновения первых в глубины Черного моря и в дальнейшем сравнительно мало подвергается воздействию поверхностных вод, лишь медленно отдавая им свои верхние слои. В то же время верхний слой, до 800 — 1000 м, находится в состоянии более активных внутренних движений. Несомненно, что потребуется внимательный и детальный пересмотр всех данных по вертикальному распределению гидрологических, гидрохимических и микробиологических показателей, и вероятно, для всех этих величин будут найдены зависимости их вертикального распределения от характера и интенсивности движения вод на разных глубинах, и, в частности, переломный характер горизонта 800—1000 м.

Попытаемся изобразить в виде схемы наши гипотетические представления о внутреннем водообмене в Черном море (рис. 2). Прежде всего нужно подчеркнуть, что нет никакого основания и необходимости думать, что сообщение между слоями всей толщи воды, в самом существовании которого, повидимому, уже невозможно сомневаться, осуществляется в виде непрерывных вертикальных потоков. Таких потоков, конечно, нет, и связь

между отдельными зонами имеет различный характер на разных глубинах. Тем не менее вся водная масса Черного моря составляет единое тело с соподчиненными динамическими явлениями во всех его частях. Разумеется, мы должны полностью отказаться от прежнего подразделения водной массы Черного моря на два независимых слоя с их якобы собственными закономерностями. Противопоставление аэробной и анаэробной зон сохраняет свой смысл только для целей биологии и химии, поскольку характеризует специфический признак, определяющий условия жизни и направление химических процессов. Принимая общую связь процессов во всей толще воды, мы ни на минуту не должны упускать из виду то несомненное обстоятельство, что вертикальный водообмен в Черном море затруднен и замедлен, явным следствием чего и является нарастание солености с глубиной. Но отсутствие резких градиентов солености служит, с другой стороны, показателем противоположного процесса — наличия связи и водообмена, а величина этих градиентов на разных глубинах должна показать интенсивность водообмена и расчленение водной массы на характерные зоны.

Движущими силами, вызывающими процессы вертикального водообмена, являются: 1) ветер, создающий систему поверхностных течений; 2) вращение земного шара, вызывающее отбрасывание течений направо и винтообразное вращение струй течений; 3) охлаждение поверхностных слоев; 4) нагревание глубинных слоев; 5) внутренние волны; 6) турбулентные движения; диффузия.

Водная масса Черного моря разделяется на основные зоны в зависимости от степени воздействия перечисленных факторов. Повидимому, в качестве первого приближения, можно принять три основные зоны и две промежуточные, а всего пять зон. В то же время три верхние зоны составляют вместе некоторое единство по внутренним динамическим связям и могут быть до некоторой степени противопоставлены нижним зонам. С другой стороны, три нижние зоны более едины по другим свойствам и могут быть противопоставлены двум верхним. В этом нет принципиального противоречия, ибо все они так или иначе связаны между собой, но отдельные характерные факторы и процессы выявляются в них, последовательно сменяя один другого.

Основным фактором вертикального водообмена в Черном море является система винтообразно вращающихся струй течений, отбрасываемых в своих поверхностных слоях к периферическим частям халистатических областей и вызывающих соответственное обратное движение на глубине таких же водных масс от периферии к центру, и соединительные вертикальные движения: вниз — на периферии халистатических областей и вверх — в центре их. Эта общая система вращения струй захватывает, повидимому, толщу до 1000 м, поскольку для этой глубины прослеживается куполообразность изоповерхностей. Вычисления Неймана дали именно для этой глубины максимальные величины обратных потоков, а гидрохимические и бактериологические показатели также дают возможность считать эту глубину переходной к гораздо более однородной нижней зоне. Толща воды, в основном охваченная вращением струй течений, разделяется на две основные зоны: в верхней зоне движение происходит от центра халистатической области к периферии, в нижней — в обратном направлении. Расположенный между ними промежуточный слой, подвергающийся воздействию двух противоположно направленных масс, скользящих выше и ниже, оказывается в основном охваченным местными турбулентными движениями и внутренними волнами, а частично,

может быть, более выраженными, вертикально направленными потоками в центре и на периферии. Верхняя зона охвачена также термической вертикальной конвекцией со всеми вытекающими отсюда последствиями. Турбулентные движения второй (промежуточной) зоны вызывают, с одной стороны, проникновение кислорода далее вглубь, но в уменьшающихся количествах, и с другой — проникновение сероводорода снизу, также в уменьшающихся количествах, тем более что кислород и сероводород реагируют между собой, исчезая из раствора. Нижняя зона характеризуется замедленностью горизонтальных движений с глубиной и большой однородностью в распределении солености, несмотря на приток мраморноморских вод.

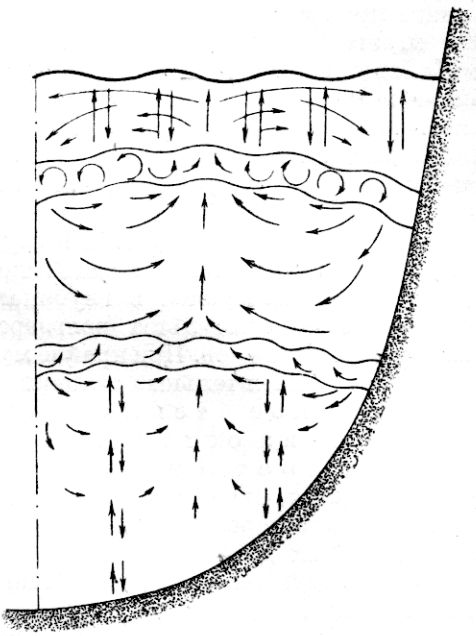

Рис. 2. Рабочая схема вертикального водообмена в Черном море

Условия в глубоких слоях Черного моря описываются с новых позиций в следующих словах: «Что касается вод Черного моря ниже 1000 м, то вся масса воды, начиная, примерно, с этой глубины до самого дна, является почти однородной по своим физическим свойствам. Наблюдаемое небольшое повышение температуры с глубиной обусловлено адиабатическим эффектом — нагреванием вследствие сжатия воды под давлением вышележащих слоев воды. Однородность потенциальной температуры и весьма незначительное увеличение солености с глубиной делают водную массу глубинных слоев мало устойчивой, а поэтому небольшое нагревание придонного слоя за счет теплового излучения земной коры и тепла, сообщаемого воде в результате процессов радиоактивного распада и минерализации органических веществ, протекающих на дне моря, оказывается достаточным, чтобы вызвать конвекционное перемешивание глубинных вод, направленное снизу вверх».[3]

Почти полное соответствие наблюдаемого в глубинах Черного моря распределения температур с теоретически возможным под влиянием адиабатического эффекта было установлено еще Ф. Ф. Врангелем в 1892 г. и в дальнейшем принималось вплоть до Ю. М. Шокальского (1934) и авторов вышеприведенной цитаты (1946). Однако Г. Нейман (1943) смотрит на этот вопрос иначе: «Наблюдения в Черном море показывают, что распределение температур в нижних слоях воды не есть адиабатическое, как это можно было бы предположить и как это принимал Шокальский. Распределение температур, близкое к адиабатическому, устанавливается только в промежуточном слое около 1000 м глубины. Если бы стратосфера

[3] Сборник «Памяти Ю. М. Шокальского» вышел (1946) после того, как эта работа была написана и доложена. Здесь мы видим отражение тех же материалов, которые частично послужили толчком для работы Г. Неймана.

Черного моря была в полном покое,— как это, повидимому, и есть на самом деле,— и при повышающейся солености с глубиной устойчиво расслоена, тогда должны были бы именно здесь создаться условия для повышения температуры в близких к дну слоях под воздействием теплоты земли и процессов распада. Так как этого нет, то нужно принять, что особые динамические условия в глубине производят наблюдаемое разделение слоев. Возможно, в этом принимают участие также химико-биологические процессы. Но что химические реакции при образовании сероводорода (которые в конечном счете протекают как экзотермические) должны привести именно к накоплению теплоты в среднем от глубины 1000 м, это не легко доказать».

Любопытно, что Нейман, который признал наличие глубокого водообмена в Черном море, все же считает нужным оставить стратосферу в покое. Поскольку глубинные слои солонее вышележащих, это может происходить лишь потому, что сюда в относительно большей пропорции попадают мраморноморские воды. Если же это так, они должны, опускаясь вниз, испытывать сжатие и соответственно повышать свою температуру. Поэтому сомневаться в наличии в глубинных слоях того количества теплоты, которое соответствует адиабатическому эффекту, конечно, не приходится. Установившаяся в глубинах Черного моря средняя температура около 9° есть результат долговременного воздействия всех внешних и внутренних факторов. При крайне малой устойчивости глубинных слоев (по причине незначительных отличий в солености и температуре) всякое прибавочное тепло вызовет конвекцию, а на месте снова останется только та температура, которая соответствует глубине и общему запасу теплоты в смешивающихся слоях. Поэтому мы не можем ожидать перегревания придонных или каких-либо других слоев, так как всякая добавочная теплота будет истрачена на вертикальную конвекцию, идущую навстречу выше лежащим, более холодным слоям, испытывающим отдаленное воздействие зимних охлаждений. Поэтому мы принимаем, что обращенная вертикальная конвекция есть основной фактор перемешивания в глубинных слоях и что отсутствие здесь повышения температуры сверх адиабатического эффекта есть не возражение против наличия добавочных источников тепла, а подтверждение их наличия.

Нам кажется, что существование перечисленных четырех характерных слоев достаточно обосновано не только логическими рассуждениями, но и хорошо известным фактическим материалом. Однако можно высказать предположение о существовании еще одной зоны, и именно переходной между третьей и нижней. Это четвертая, промежуточная область, лежащая на границе между третьей зоной, нижние слои которой находятся в наиболее быстром движении (по Нейману), и пятой зоной, охваченной вертикальной конвекцией. Возможно, что преобладающими формами движения в этом промежуточном слое также являются турбулентное движение и внутренние волны, как и в верхнем промежуточном слое, возникающие в результате соприкосновения более быстро движущихся слоев третьей зоны с малоустойчивыми слоями пятой.

Итак, реальный путь взаимного проникновения пресных вод сверху и осолоненных снизу мы представляем в следующем виде, начиная сверху:

в первой зоне — подъем в центре, горизонтальное движение к периферии, опускание у периферии, термическая конвекция;

во второй — турбулентное перемешивание, внутренние волны;

в третьей — подъем в центре, горизонтальное движение к центру, опускание у периферии;

в четвертой — турбулентное перемешивание, внутренние волны;

в пятой зоне — термическая конвекция, слабое движение от периферии к центру.

Разумеется, турбулентные движения могут быть и безусловно имеются во всех слоях, но мы не помещаем их в схему, так как на ней показаны основные отличия движения слоев. Реальным результатом описанных движений является ежегодный увод в глубины избытка пресных вод и подача из глубин избытка мраморноморских. Значение турбулентных движений в этом процессе может быть понято из следующего соображения. Мы показали выше, что для стабилизации солености поверхностных слоев на уровне $18‰$ необходимо, чтобы ежегодно в поверхностные слои наравне с одним объемом пресных вод поступал шестикратный объем глубинных вод (при солености $21‰$). Простая взаимозаменяемость одного объема и шести объемов невозможна. В слое, где идет термическая конвекция, смешение верхних и нижних слоев в течение периода охлаждения может произойти несколько раз, но ниже слоя термической конвекции такое неравномерное смешение возможно только при наличии турбулентных движений, в своей сумме и взаимной связи обеспечивающих ежегодную подачу к первой зоне 3000 км³ глубинной воды навстречу 500 км³ пресной и в несколько приемов смешивающих их в пропорциях, уменьшающихся с глубиной.

Рассмотрим общие условия солевого баланса Черного моря. Повышение солености Черного моря происходит в том случае, если из Мраморного моря приносится солей больше, чем выносится с верхним течением. При каждой данной солености Черного моря устанавливается равновесие солености при условии, если отношение количеств притекающей и вытекающей воды обратно пропорционально соленостям этих вод. Если это отношение меняется в ту или иную сторону, то начинается опреснение или осолонение Черного моря. Направление этого процесса зависит не от абсолютных величин притока и оттока, а от их отношения. При солености в Черном море $12‰$ отношение соленостей равно 12 : 36, или 1 : 3. Следовательно, для стабилизации солености отношение потоков должно быть 3 : 1; например, притекает в Черное море 120, вытекает 360 км³. Произведение из этих объемов воды на соответственные солености даст одну и ту же величину прибыли и потери солей в течение года. Если соотношение оттока и притока будет равно 2 : 1, то равновесие установится по достижении солености в Черном море $18‰$, так как 18 : 36 = 1 : 2. Для достижения равновесия при $S = 22‰$ (нынешняя соленость Черного моря в целом) отношение потоков должно быть равно 36 : 22. Если мы условно примем, что процесс осолонения Черного моря начался от солености $12‰$ (т. е. солености «каспийского типа»), то за промежуток времени от начала этого процесса и до достижения солености Черного моря $22‰$ соотношение оттока и притока, хотя могло быть в разные периоды различным, в общем должно было быть в начале процесса меньшим, чем 3 : 1, и в конце процесса равным 33 : 22, или грубо—3 : 2. Если после этого отношение снова увеличилось, то начался обратный процесс — опреснение Черного моря. Если бы Черное море не имело избытка пресной воды, то два течения в Босфоре находились бы в отношении 1 : 1, и по истечении некоторого времени соленость этих морей должна была бы уравняться. Избыток поступления пресной воды в Черное море увеличивает верхнее течение в Бос-

форе и угнетает нижнее противотечение. Разность этих течений выражает избыток пресных вод.

Чтобы понять основные черты исторического процесса осолонения Черного моря, рассмотрим некоторый условный случай. Примем, что в течение 5000—6000 лет (такой возраст геологи приписывают новейшему бассейну Черного моря) водообмен в Босфоре сохранял, примерно, одну и ту же интенсивность. Его суммарным результатом было повышение солености от 12 до 21—22‰. Как было установлено выше, для удержания солености на этом уровне требуется, чтобы отношение верхнего и нижнего течений равнялось 36 : 22, или, примерно, 3 : 2. Чтобы повысить соленость от 12 до 22‰, нужно прибавить к каждому литру воды Черного моря 10 г солей. Если этот процесс длился в течение 5000 лет, то ежегодно в среднем увеличение солености составляло 10 : 5000 г на литр воды, или 0.002‰.

Объем Черного моря равен 500 тыс. км³, в литрах —500 тыс. $\times 10^{12}$. Следовательно, средний ежегодный приход солей должен составлять $0.002 \cdot 500000 \cdot 10^{12}$, или $1000 \cdot 10^{12}$ г солей. Так как каждый литр воды из Мраморного моря приносит 36 г солей, то указанное количество соли заключается в $\frac{1000 \cdot 10^{12}}{36}$ л мраморноморской воды, или, примерно, в 30 км³ воды. Это количество мраморноморской воды, следовательно, должно ежегодно в среднем составлять избыток притекающей мраморноморской воды сверх того соотношения вытекающей и втекающей воды, которое в каждый данный год требовалось для удержания уровня солености Черного моря на достигнутой высоте (что было рассмотрено выше). Такой ход процесса является минимумом интенсивности водообмена в Босфоре, если нарастание солености шло равномерно. Если же мы предположим, что водообмен в Босфоре с самого начала превышал этот минимум, то ход осолонения будет иным.

Допустим, что при начальной солености бассейна в 12‰, установился в Босфоре водообмен с отношением дебетов верхнего и нижнего течений, как 36 : 22, например, вытекает 360, втекает 220 км³. Нижнее течение принесет в год $36 \cdot 220 \cdot 10^{12}$ г солей, верхнее вынесет $12 \cdot 360 \cdot 10^{12}$ г. Приход составит $12 \cdot 10 \cdot 10^{12} \cdot (3 \cdot 22 - 36)$, или $12 \cdot 10 \cdot 10^{12} \cdot 30$. Разделив этот приход солей на объем Черного моря в литрах, мы получим $\frac{12 \cdot 10 \cdot 10^{12} \cdot 30}{500000 \cdot 10^{12}} = \frac{12 \cdot 3}{5000} = 0.0072$ г на литр воды, или 0.0072‰, что и составляет при данных условиях повышение солености в первый год такого водообмена. Поскольку вода в Черном море приобрела в результате соленость 12.0072‰, в следующий год количество солей, выбывающих из Черного моря, будет уже несколько бо́льшим, в то время как количество притекающих солей останется прежним. Оставаясь в рамках приближенных и элементарных вычислений и не задаваясь целью изобразить этот процесс точной математической формулой, поскольку мы можем лишь установить тенденцию процесса, а не его абсолютные величины, примем для дальнейших расчетов условные периоды не по году, а по 100 лет. За 100 лет соленость повысится на $0.0072 \cdot 100 = 0.72$‰ и сделается равной 12.72‰. Повторив предыдущий расчет, исходя из этой новой солености, получим, что в следующий период при том же водообмене соленость будет повышаться в год на 0.0066‰ и через 200 лет окажется равной 13.36‰. В начале третьего столетия осолонения нарастание солености составит уже 0.0062‰. Если нарастание для всего третьего столетия примем равным $0.006 \cdot 100 = 0.6$‰, то через 300 лет соленость окажется равной 13.96‰, или кругло —14‰. Таким

образом, ход изменения солености при принятых нами условиях течений выразится по столетиям величинами: 12, 12.7, 13.36, 14‰. Уменьшаясь соответственно и далее из года в год, приращение солености дойдет до нуля по достижении Черным морем солености 22‰ и останется на этом уровне, если отношение дебетов течений в проливе будет оставаться равным 36 : 22.

В действительности, при принятых нами условиях течений в Босфоре, ход осолонения будет итти даже быстрее, чем указано выше, так как при вычислениях мы игнорировали два немаловажных обстоятельства: 1) глубинные, более осолоненные воды не сразу достигают поверхности, поэтому в первые периоды продолжает вытекать пресная вода, и в дальнейшем вытекающая поверхностная вода имеет меньшую соленость, чем в среднем масса вод Черного моря, и, следовательно, чистый ежегодный приход солей будет бóльшим; 2) разность плотностей вод мраморноморской и черноморской, вначале наибольшая, далее уменьшается, следовательно, неизменно уменьшается и одна из побудительных причин встречных течений. Мы можем попытаться графически изобразить наши выводы, нисколько не претендуя на фактическую точность и лишь отображая основное направление процесса. Отложим на оси абсцисс время (6000 лет) и на оси ординат соленость (от 12 до 22‰). Начав от солености 12‰ для всей массы воды, мы имеем в конце периода для поверхностной воды 18‰ и глубинной — около 22‰. Если бы процесс осолонения шел равномерно, он был бы изображен прямыми линиями, соединяющими начальную и конечную соленость. Приведенные соображения расчета показали, что процесс идет иначе: вначале ускоренно, а затем замедляясь. Нанеся на график три полученные выше солености для первых трех столетий, получаем гипотетическое направление кривой для начальных стадий осолонения. Конечная часть кривой должна стать параллельной оси абсцисс, поскольку осолонение прекращается. Соединив плавной кривой ее начальную и конечную части, получаем кривую *A*, гипотетически изображающую ход изменения солености в общей массе воды Черного моря при принятых условиях. Таким же образом построена кривая *B*, изображающая ход изменения солености поверхностных вод (рис. 3). Рассмотрение этих кривых показывает, что в течение уже первых 500 лет соленость повышается до 14.5‰, в то время как при равномерном процессе (прямая линия) она была бы достигнута в 1500 лет.

Общий ход осолонения выражается следующими величинами:

Таблица 2

Время (в годах)	Соленость общая и ее приращение	Соленость на поверхности и ее приращение
0	12 + 4.4	12
1000	16.4 + 2.2	14.5 + 2.5
2000	18.6 + 1.6	16 + 1.5
3000	20.2 + 1.0	16.8 + 0.8
4000	21.2 + 0.6	17.4 + 0.4
5000	21.8 + 0.2	17.8 + 0.2
6000	22.0	18

Эта черта процесса осолонения при данных условиях — более интенсивного вначале и затухающего в дальнейшем — должна быть признана основным свойством этого процесса, тем более, что подобная тенденция

усиливается упомянутыми уже сопутствующими факторами. Возможно, что в отдельные моменты ход процесса изменялся, но на всем процессе лежала одна обязательная черта: чем ближе по времени к началу процесса осолонения, тем меньший водообмен в проливе достаточен был для получения определенного результата; при сохраняющейся интенсивности водообмена скорость осолонения уменьшается.

Из этих рассуждений можно сделать некоторые выводы. Отмеченная геологами резкая смена фаун в донных отложениях Черного моря может найти свое законное объяснение в описанных основных свойствах водо- и солеобмена в Босфоре, без привлечения каких-либо чрезвычайных катастрофических событий. Действительно, при весьма умеренных условиях

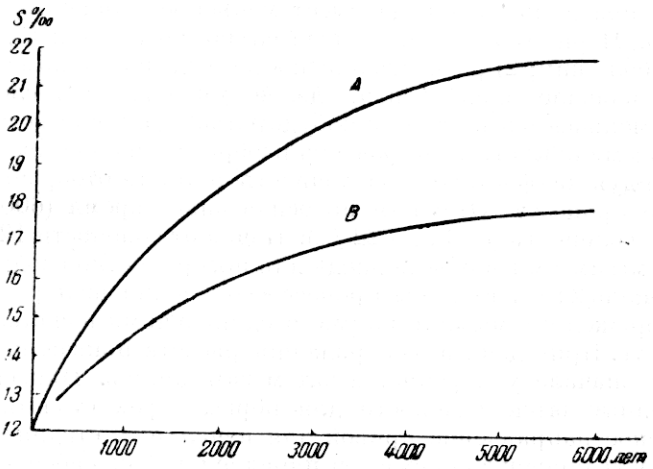

Рис. 3. Реконструированный ход изменения солености Черного моря после прорыва Босфора:
A — глубинных вод; *B* — поверхностных вод

водообмена в Босфоре, как мы видели, в течение немногих столетий должны были наступить столь резкие изменения в солености Черного моря, что фауна тоже должна была резко смениться. Разумеется, изложенные соображения ни в какой степени не претендуют на подлинное воспроизведение происходивших процессов, а лишь улавливают некоторые из характерных черт, с которыми, вероятно, следует считаться при разрешении гидрологических, геологических и биологических вопросов, относящихся к режиму водо-солеобмена в Босфоре. Нам кажется очевидным, что расчеты водообмена в Босфоре, особенно в прошлом, в рассмотренной нами работе Иллиота и Ильгаза неправильны. Повидимому, «классическая тема океанографии» — водообмен в Босфоре — еще далеко не исчерпана и требует нового глубокого анализа с учетом явлений, происходящих в Черном море, и истории последнего. Работа Иллиота и Ильгаза не только ничего не прибавила для общего понимания водообмена Черного моря, но, вероятно, повела этот вопрос по неправильному пути.

Разрешение этой проблемы остается комплексной задачей исследователей Черного моря.

Небезынтересно коснуться вопроса о влиянии опусканий и поднятий дна бассейна на водообмен в проливе и общий режим солености моря. В этом отношении в геологической литературе принято считать, что опускание дна вызывает осолонение, поскольку углубляется Босфор, а поднятие дна вызывает опреснение, поскольку Босфор мельчает. Режим водо-

обмена в Босфоре зависит от глубины пролива, соотношения плотностей воды, разниц уровней и режима ветров. Поскольку вертикальные перемещения дна в бассейне и в самом проливе могут быть неодинаковыми или неодновременными, следует эти два процесса рассмотреть отдельно. Понятно, что углубление Босфора способствует усилению водообмена и обмеление его — ослаблению последнего. Опускание или поднятие дна в самом бассейне моря влияет на режим водообмена в проливе через изменение уровня моря.

Местное поднятие дна в бассейне моря вызовет уменьшение объема бассейна и поведет к повышению уровня. Поднятие уровня вызовет усиление верхнего течения в Босфоре и подавление нижнего течения до того момента, когда уровень снова вернется к прежнему положению. Результатом этого будет, наряду с задержкой поступления соленой воды, ускорение стекания той части опресненного поверхностного слоя, которая оказалась поднятой над первоначальным уровнем, а также поднятие всех пограничных слоев, т. е. утончение слоя тропосферы. Объем бассейна уменьшится за счет верхних слоев, и общее процентное содержание солей временно повысится.

В случае опускания дна, т. е. увеличения объема бассейна и понижения уровня, будут одновременно происходить два процесса: 1) уменьшение стока поверхностных вод и 2) усиление притока соленых вод. Таким образом, поверхностные слои будут задерживать дополнительные порции пресной воды, а более глубокие слои будут получать дополнительные порции соленой воды. Можно предполагать, что временно наступит более резкое расслоение в промежуточном слое. Если принять приближенно, что количество добавочно притекающей соленой воды равно уменьшению дебета верхнего босфорского течения, т. е. количеству пресной воды, дополнительно задерживаемой в море, то окажется, что изменение режима солевого обмена выразится в дополнительном поступлении в Черное море равных объемов мраморноморской и пресной воды, что при смешении даст соленость $18^0/_{00}$. Если море до опускания дна имело соленость ниже $18^0/_{00}$, то оно будет осолоняться; если же выше $18^0/_{00}$, то оно будет опресняться. Таким образом, для Карангатского бассейна опускание дна означало опреснение, а для Новоевксинского — осолонение.

Если вертикальное движение дна бассейна охватывает также и район пролива, то получается совокупное действие обеих причин, результат которого может быть разнообразен в зависимости от конкретной обстановки и последовательности событий. Повидимому, его трудно выразить в упрощенной форме. Возможен случай, когда последовательно сменяющие друг друга поднятия и опускания будут действовать подобно сердцу, прогоняющему жидкость в одном направлении: поднятие сбрасывает часть верхних слоев, что дает осолонение, а опускание вслед за тем, усиливая нижнее течение в проливе, также способствует осолонению. Было бы желательно на основе детального сравнительного анализа распределения террас и донных отложений попытаться восстановить картину воздействия морфометрических изменений бассейна на его гидрологический режим через посредство водо- и солеобмена в Босфоре. Возможно, что это позволит подойти и к вопросам колебания продуктивности в отдельные моменты жизни бассейна, поскольку они отражаются на обилии органических остатков в донных отложениях.

Со стороны гидробиологии нами в 1935 г. был поднят вопрос о необходимости пересмотра установившихся взглядов на циркуляцию вод в Черном море. Нам удалось тогда показать, что общепринятые взгляды на

якобы весьма низкую продуктивность открытых вод Черного моря и на их низкую значимость в промысловом отношении коренятся в чрезмерной переоценке классических взглядов на циркуляцию вод в Черном море и безвозвратный увод в его глубины биогенных веществ с дождем трупов из поверхностных слоев. Эти наши выступления вызвали первоначально, даже среди части знатоков Черного моря, недоумение и отрицание, доходившее до крайних форм. Еще раньше нам удалось доказать, что в открытых водах Черного моря происходит массовое размножение таких видов рыб, которые не только не считались массовыми в открытых водах Черного моря, но даже признавались лишь случайно приходящими из Средиземного моря. Тогда же стало ясно, что весь вопрос о жизни открытых вод Черного моря нужно изучать заново, без всяких предвзятых мыслей.

Рыбопромысловые научные учреждения оказались отзывчивыми к этим идеям и снарядили экспедиции для изучения открытых вод Черного моря и их рыбных богатств. Авиаразведка обнаружила огромные косяки рыб (хамсы, шпрота, пеламиды). Комплексные гидробиологические работы под руководством С. М. Малятского подтвердили наши основные установки. Теперь уже никто не сомневается в том, что открытые воды Черного моря — не пустыня, и рыбная промышленность намечает планы их использования.

Гидробиологи могут чувствовать моральное удовлетворение от того, что были инициаторами освоения этих заброшенных богатств, и, вероятно, в истории изучения Черного моря эти моменты не будут забыты. Предстоит работа по детальному переисследованию с новых точек зрения всей жизни открытых вод Черного моря, режима биогенных веществ, циркуляции вод.

Во всех этих работах необходимо вдумчивое и глубокое участие гидрологов. Если автор, не будучи гидрохимиком, рискнул ранее выступить по вопросу о режиме биогенных веществ в Черном море, и, не будучи гидрологом, сейчас высказывается по чисто гидрологическим вопросам, то лишь потому, что он ищет ответа на неясные вопросы, возникающие при изучении биологических процессов в Черном море, и просит гидрологов помочь в их разрешении.

Один из молодых исследователей Черного моря, А. Д. Добровольский (1933), писал: «Современная океанология все меньше и меньше удовлетворяется умозрительными заключениями, основанными на «визуальном», так сказать, анализе гидрологических данных. Все больше и больше в океанологию проникают точные науки, физика и математика, которые дают возможность делать достаточно точные и объективные, количественные и качественные характеристики. Надо сказать, что, несмотря на это, «точная океанология» еще недостаточно сильна, она только еще начинает развиваться, и потому, как бы ни было велико желание оперировать формулами, часто приходится довольствоваться старыми описательными методами. В особенности это относится к тем случаям, когда происходит накопление материала по вопросам и объектам мало изученным...».

Развивая свои мысли о строении Черного моря, мы, конечно, не собирались подменять ими точные методы современной океанографии, к которым относимся с глубочайшим уважением. Но применение точных методов не есть вопрос только техники и ремесленной обученности в работе, аккуратно выполняемой по указанным инструкциям. Вероятно проблемы строения Черного моря уже давно можно было изучить при помощи точных методов, если бы шире был размах комплексных представлений о

нем, если бы разные науки, изучающие море, больше были объединены в своей работе.

Много серьезных проблем связано с познанием Черного моря. Может быть, в будущем человечество найдет нужным вмешаться в управление его гидрологическим режимом. Еще в 1902 г. А. А. Остроумов писал: «Так что же ждет Черное море? Опреснение или осолонение? Заселение его вновь немногими оставшимися формами древней фауны или полнота и разнообразие жизни, не многим уступающие Средиземному морю? Задача, конечно, сложная, так как подобного рода процессы слагаются из целого ряда факторов. Пришлось бы иметь в виду и будущие изменения климата окружающих стран, и колебания в количестве осадков на Российской равнине. Упрощая задачу, можно сказать, что ключ к решению этой дилеммы находится у Константинополя, в поперечном сечении Босфора. Необходимо располагать точными данными о том, какое количество тяжелой воды проходит здесь ежегодно в Черное море, а также какое количество и с каким содержанием соли выносится из Черного. Тогда только мы и будем знать, находится ли количество солей в Черном море в стационарном состоянии, или вносится избыток соли, или, напротив, соли выносятся больше, чем успевает подавать подводное босфорское течение. Но пока в нашем распоряжении нет точных данных. Одно косвенное обстоятельство дает, пожалуй, право заключить о ходе процесса в сторону опреснения. Это находка в черноморских отложениях нескольких средиземноморских раковин из числа не живущих теперь в Черном море. Надо думать, условия изменились в сторону, неблагоприятную для них, в сторону опреснения, что может быть в связи с засорением Константинопольского бара. Всякое повышение или понижение этого бара даже на 1 м должно давать довольно существенное изменение в характере обмена вод на Босфоре.

Ввиду этого вместо всяких гаданий о будущем Черного моря одно можно сказать, что судьбы этого моря на время могут быть в руках человечества, в тех гидротехнических сооружениях, какие можно произвести от азиатского берега к европейскому на линии Скутари — Константинополь».

ВЫВОДЫ

Исходя из биологических данных и развивая свои прежние работы (1937—1941), автор делает попытку изложить представление об основных чертах водообмена в Черном море, рассматривая эту попытку как комплексную рабочую гипотезу, пригодную в качестве основы для постановки дальнейших специальных исследований по режиму биогенных веществ и биологической продуктивности.

Исследования автора над пелагическими яйцами и личинками рыб привели к открытию обильного нахождения и размножения в Черном море, преимущественно в открытых водах, нескольких видов рыб, которые ранее считались малочисленными или случайными для Черного моря (шпрот, пеламида и др.).

Ввиду крушения представлений о бедности жизнью открытых вод Черного моря автор подверг пересмотру известные работы о биогенных веществах в Черном море и доказал, что авторы этих работ дали неверное истолкование собственным фактическим материалам. Исходя из гидрохимических данных, автор пришел к выводу о необходимости допущения взаимообмена между глубинными и поверхностными слоями Черного моря. Исходя из факта куполообразности изоповерхностей, автор развил

мысль о непрерывном опускании поверхностных слоев на периферии кольцевых течений и подъеме глубинных слоев в средних частях халистатических областей под влиянием вращения струй течений вокруг своих осей. Автор пришел к выводу о необходимости полного изменения представлений о строении водной массы Черного моря (1941).

Исходя из того, что Черное море ежегодно получает избыток пресной воды объемом не менее 500 км³, автор подсчитал, что если бы эти пресные воды смешивались только с поверхностными слоями, охватываемыми термической конвекцией, как это принималось до сих пор, то Черное море в поверхностных слоях должно было бы за последние 60 лет опреснится на 6‰, чего в действительности не наблюдается. Из этого следует, что, поскольку из Черного моря с верхнебосфорским течением вытекает не пресная вода, а вода с соленостью 18‰, поступающие в Черное море пресные воды подвергаются глубокому перемешиванию. Вычисление показывает, что для этого в ежегодное смешение с поверхностными водами должны вступать глубинные воды в количестве, равном шестикратному объему избытка пресных вод. Исходя из этого, можно подсчитать скорость перемещения водных масс снизу, которая составляет, по мнению автора, примерно 30 м в год, с той оговоркой, что с глубиной перемешивание замедляется. Отсюда вытекает, что срок, необходимый для продвижения вод Черного моря с глубины до поверхности, измеряется не тысячами лет, как принимали геологи, а только сотнями.

Исходя из того, что для достижения стабильности солености Черного моря, при любой ее величине, необходимо, чтобы отношение оттока и притока было обратно пропорционально соленостям двух босфорских течений, и что Черное море, начав свой процесс осолонения от солености, примерно 12‰, достигло в настоящее врямя солености 22‰ (хотя одно время соленость была и несколько выше), автор пришел к выводу, что в среднем за геологическое время существования Черного моря соотношение дебетов верхнего и нижнего босфорских течений равнялось, примерно, 3 : 2 и должно быть и в настоящее время таковым, поскольку многолетние наблюдения не обнаруживают заметных изменений солености ни на поверхности, ни на глубине. Чтобы представить характер хода осолонения Черного моря после прорыва Босфора, автор условно принял, что пропускная способность Босфора осталась, примерно, одинаковой, и вычислил, что соленость от начальной 12‰ в последующие шесть тысячелетий изменялась следующим образом: 16.4, 18.6, 20.2, 21.2, 21.8, 22. Процесс вначале идет очень быстро и постепенно затухает. Создаются условия для быстрой гибели прежней фауны, и через 1—1.5 тысячи лет уже имеется соленость, достаточная для существования большого количества средиземноморских форм.

На основании всей совокупности ранее опубликованных исследований, а также соображений, развитых в данной работе, автор предлагает гипотетическую схему внутреннего водообмена в Черном море. Вся водная масса Черного моря составляет единое тело с соподчиненными динамическими процессами во всех его частях. Противопоставление оксибионтной и аноксибионтной зон сохраняет свое значение для целей биологии и химии, поскольку указывает на условия жизни и направление химических процессов. Основной вертикальный обмен автор представляет как систему вращающихся вокруг своих осей струй течений, отбрасываемых в поверхностных слоях (где эти течения зарождаются) к периферическим частям двух халистатических областей и вызывающих своим перемещением и вращением соответственные встречные перемещения в более глубоких слоях.

Нарастание плотности воды с глубиной вызывает заметные различия в характере и размерах движения разных слоев, которых автор различает четыре или пять.

Верхний слой характеризуется признаком, резко отличающим его от нижележащего слоя, а именно наличием термической конвекции со всеми вытекающими из этого последствиями, далее — движением водных масс от центров халистатических областей к их периферии и происходящим от этого подъемом воды в центре и опусканием у периферии. Второй слой — промежуточный, слой Н. М. Книповича, зона внутренних волн и турбулентного перемешивания. Результатом перемешивания, хотя и замедленного, является наличие здесь кислорода, несмотря на невозможность термической конвекции.

Третий и четвертый слои характеризуются перемещениями водных масс, выравнивающих перемещения в верхнем слое и направленных от периферии к центру с подъемом в центральных частях. Третий слой, достигающий 1000 м, возможно (по вычислениям Неймана) характеризуется возрастанием с глубиной скоростей движения. Он несет еще явные следы куполообразного строения изоповерхностей, а по гидрохимическим показателям обнаруживает заметные различия на разных глубинах, являющиеся результатом различной степени смещения поверхностных и глубинных вод. Нижний слой характеризуется медленными движениями, однако достаточными, чтобы поддержать почти полное однообразие солености и температуры во всей толще этого слоя. Весьма вероятно, что перемешивание здесь поддерживается в основном термической конвекцией под воздействием процессов нагревания глубинных слоев рядом факторов. Возможно, что связь нижнего, пятого слоя с третьим осуществляется через промежуточный, четвертый слой, охваченный слабыми турбулентными движениями, вызываемыми соприкосновением более быстро движущихся масс третьего слоя с неустойчивыми массами пятого.

Необходимость признания значительных вихревых движений во всей толще воды Черного моря вытекает из того, что непосредственное взаимное замещение одного объема поверхностных пресных вод и шести объемов глубинных вод невозможно и происходит только в виде многократного послойного перемешивания.

Если разделить водную массу Черного моря на две основные зоны, то с точки зрения динамики вероятнее всего принять границу между ними на глубине около 1000 м. Именно ниже этой глубины начинается гораздо более однородная область, в основном подверженная собственной термической конвекции.

ЛИТЕРАТУРА

Ангелов Б. Движение на водата в Черно море. Спис. на Бълг. Акад. на Наук 1935.

Андрусов Н. И. О сероводородном брожении в Черном море. Зап. Акад. Наук по ф-м. отд., 1894, № 1.

Андрусов Н. И. и Зернов С. А. Черное море. Путеводитель «Крым». Симферополь, 1914.

Архангельский А. Д. и Страхов Н. М. Геологическое строение и история развития Черного моря. 1938.

Водяницкий В. А. Успехи изучения биологии Черного моря. Изв. АН СССР, 1937.

Водяницкий В. А. К вопросу о биологической продуктивности Черного моря. Тр. Зоол. ин-та АН СССР, 1941, т. VII, вып. 2.

Данильченко П. Т. и Чигирин Н. И. К вопросу об обмене веществ в Черном море. Зап. Крымск. об-ва ест. и люб. прир., Симферополь, 1929.

Добровольский А. Д. Динамическая карта восточной части Черного моря. Изв. Г-МИЧАМ, 1933, 1.
Караогланов З. Химия на Черное море. Тр. на Черном. биол. ст. въ Варна, 1934, № 3.
Книпович Н. М. Вертикальная циркуляция и распределение кислорода в морях Черном и Каспийском. Изв. Гос. гидрол. ин-та, 1930.
Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Черном море. Тр. Аз-Чер. экспед., 1933, вып. 10.
«Лоция Черного моря». 1937.
Макаров С. О. Об обмене вод Черного и Средиземного морей. Зап. Акад. Наук. СПб., 1885.
Малятский С. М. Материалы по экологии населения пелагиали Черного моря. Тр. Новоросс. биол. ст., 1940, т. II, в. 3.
Никитин В. Н. Вертикальное распределение планктона в Черном море. Тр. Севаст. биол. ст., 1929.
Никитин В. Н. и Скворцов Е. Ф. Гидрологические разрезы, проведенные на Черном море в августе и ноябре 1923 г. и в марте 1924 г. Зап. по гидрол. 1926, 49.
Никитин В. В. и Скворцов Е. Ф. Непериодические изменения гидрологических элементов и состава планктона у южных берегов Крыма. Зап. Крымск. об-ва ест., 1926б, 9.
Никитин В. Н. Распределение биомассы планктона в Черном море. ДАН СССР, 1945, т. 47, № 7.
Остроумов А. А. Жизнь южнорусских морей. Казань 1902.
«Памяти Ю. М. Шокальского». Сборник статей и материалов. 1946.
Чигирин Н. И. Фосфор в воде Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., 1930.
Шлямин Б. А. О внутренних волнах в Черном море. Тр. Аз.-Черн. н.-иссл. ин-та рыбн. хоз. и океаногр., 1938, вып. 11.
Шпиндлер И. Б. Материалы по гидрологии Мраморного моря. Зап. Русск. геогр. об-ва, т. XXXIII, № 2.
Шпиндлер И. Б. и Врангель Ф. Ф. Материалы по гидрологии Черного и Азовского морей, собранные в экспедициях 1890—1891 гг. Зап. по гидрол., 1899, 20.
Шулейкин В. В. Физика моря. 1941.
Якубов Л. И. Некоторые особенности биологии прибосфорского участка Черного моря. Тр. Севаст. биол. ст., 1948, т. VI.
Chokalski I. L'oceanographie de la mer N ire. Congr. intern. géogr. Varsovie 1934.
Möller L. Alfred Merz hudrographische Untersuchungen in Bosporus und Dardanellen. Veröff. d. Inst. f. Meeresk, Berlin, 1928.
Neumann G. Ueber die Stabilität der Wasserschichung im Schwarzen Meer. An. d. Hydr. u. Mar. Met., 1943a.
Neumann G. Ueber den Aufbau und die Frage der Tiefenzikulation des Schwarzen Meeres. An. d. Hydr. u. Mar. Met., 1943в.
Nikitin W. Die Planktongr nze und deren Verteilung im Schwarzen Meer. Int. R. d. ges. Hydrogr. und Hydrob., 1930.
«Rep. on the Danish. Ocean. „Exp. 1908—1910 to the Medit. and adj. Seas."
Sverdrup H. U., Johnson M. W., Fleming R. H. The oceans, their physics, chemistry and general biology New-York, 1942.
Ullyott Ph. and Ilgaz O. The Hydrography of Bosporus. Geogr. Roview, January 1946.
Vallaux C. Problème du mélange des couches oceaniques profondes. Bull. de l'Inst. Oc., 1945, № 876. — Monaco.