

К ВОПРОСУ О ПРОБЛЕМАХ И ЗАДАЧАХ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИПОЛЯРНЫХ РЕГИОНОВ МИРОВОГО ОКЕАНА

Неyman В.Г.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: vneiman2007@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 15.01.2020, одобрена к печати 30.03.2020*

Одним из климатически значимых, но недостаточно изученным в данном отношении гидрофизическим фактором в приполярных областях Мирового океана является подповерхностный слой относительно теплой морской воды субтропического происхождения. В Северном Ледовитом океане (СЛО) этот слой связан с водами Гольфстрима, высокоширотное продолжение которого в виде отрога Северо-Атлантического течения проникает в Арктический бассейн, где распространяется по пространству СЛО на глубине своей плотности. Существование подповерхностного слоя с аномальным инверсионным вертикальным профилем температуры воды имеет место также в Южном океане. В статье обсуждается проблема мониторинга динамики этого слоя и получения новых наиболее полных данных натурного эксперимента по его взаимодействию с атмосферой в контексте изменений современного климата Арктики и Антарктики. Есть основание надеяться, что планируемое развитие современных российских научных исследований полярных областей Мирового океана поможет получить исчерпывающее решение также и этой важной климатической задачи. В работе приведены некоторые ключевые результаты подобного рода отечественных океанологических исследований середины XX века, внесших существенный вклад в теорию и эксперимент, связанные с динамикой вод Южного океана. Подчеркнута необходимость современного развития такого рода исследований с целью необходимого дополнения наиболее полной реальной проверки ранее полученных результатов.

Ключевые слова: Арктика, Антарктика, Северный Ледовитый океан, Южный океан, фронтальная зона, температура, соленость, конвергенция, дивергенция, Антарктическое циркумполярное течение, полынья, конвекция, климат

Введение

Задачи, методы и средства изучения океанологических проблем холодных северных и южных приполярных регионов Земли наряду с их индивидуальной региональной спецификой объединяются одним одинаковым для двух высокоширотных океанов климатическим фактором – наличием стационарного, относительно теплого и грандиозного по своему пространственному масштабу подповерхностного слоя морской воды. О климатическом значении этой особенности гидрофизической структуры вод приполярных морских бассейнов

до 2000-х годов конкретно известно было сравнительно немного (Иванов, Репина, 2018). Существование стационарного теплого подповерхностного слоя на акватории СЛО впервые обнаружил Ф. Нансен в 80-е годы XIX века во время знаменитого ледового дрейфа на судне «Фрам». Первые отечественные измерения характеристик этого слоя в центральной части Арктического бассейна были выполнены также довольно давно, а именно в 1937 г., во время работы папанинской дрейфующей ледовой станции «Северный Полюс» (Папанин, 1938). С тех пор на эту тему было выполнено и опубликовано весьма значительное количество научных работ. Однако до сих пор еще до конца не выяснены все детали физического механизма эпизодической передачи в атмосферу тепла этого слоя, занимающего пространство водной толщи океана между горизонтами примерно 200–900 метров. Якобы происходит это либо при контакте с ней в процессе вынужденного подъёма глубинной воды к поверхности океана под влиянием эпизодически возникающего циклонического вихревого вращения столба жидкости, либо при возникновении процесса глубокой плотностной, или свободной, конвекции в случаях аномального охлаждения морской поверхности. Весьма важно подчеркнуть, что для возникновения и развития такого типа процессов вертикального теплообмена в океане в любом случае требуется наличие участков морской поверхности, открытой для непосредственного контакта с прилегающей атмосферой.

Очевидно, что в Арктическом регионе возникновение глубокой вертикальной конвекции, приводящей к «выкачиванию» тепла из подповерхностного слоя океана в атмосферу, имеет особое климатическое значение. Вполне возможно, что этот процесс, если он реально существует в рассматриваемом регионе, может быть одной из основных причин возникновения известных климатических аномалий в Арктике, в частности, наблюдаемого в современную эпоху существенного изменения ледового режима СЛО (Ivanov et al., 2016). Здесь имеется в виду известный факт уменьшения ледовитости этого бассейна, что, в свою очередь, может рассматриваться в качестве определенного признака и свидетельства существования современного потепления климата в Арктике (Алексеев и др., 2011; Алексеев и др., 2015). Таким образом, очевидно, что дальнейшее развитие исследования динамики (временной фактор) и кинематики (пространственный фактор) теплого промежуточного слоя, ассоциируемого с водной массой продолжения Гольфстрима – Северо-Атлантического течения в Арктическом бассейне, имеет приоритетное значение в решении климатических задач Северного Полярного региона.

Происхождение подповерхностного слоя воды с инверсией температуры воды в бассейне Южного океана (ЮО), по всей вероятности, связано с процессом «динамического», или вынужденного, опускания относительно теплой поверхностной водной массы в зоне Антарктической конвергенции (Houtman, 1964). Этот крупномасштабный циркумполярный динамический фронт, принимаемый многими исследователями за северную границу Антарктического региона, иногда называют также Южным Полярным фронтом (ЮПФ).

Анализируя поля гидрофизических характеристик верхней толщи воды обоих высокоширотных океанов (Defant, 1961), можно проследить процесс опускания в некоторых их регионах под влиянием динамического и гравитационного факторов теплой поверхностной водной массы. Если эта вода имеет к тому же повышенную соленость, то это позволяет ей по достижении глубины своей плотности заполнять слой толщиной в несколько сотен метров, распространяющийся на обширных пространствах СЛО и Южного океана. Организация с помощью современных исследовательских технологий систематического целевого мониторинга путей и процесса перехода тепла из этого слоя океана в атмосферу позволило бы существенно продвинуться в решении одной из важнейших задач климатологии высокоширотных регионов Земли.

Об одной из ключевых задач исследования структуры и динамики климатической подсистемы Арктического бассейна

Во всех случаях, когда говорится о возможности возникновения глубокой плотностной (термической) конвекции в океане, то, в основном, имеется в виду процесс, связанный с аномальным уплотнением воды на его свободной поверхности за счет ее переохлаждения и последующего опускания в нижележащие более теплые слои, которое возникает преимущественно в аномально суровые зимы. В процессе свободной конвекции создаются перемежающиеся по направлению вертикальные потоки тепла и массы, приводящие к одновременному понижению температуры глубинных слоев океана и повышению температуры воды его верхнего слоя. В этой связи следует отметить, что в конце XX века в рамках международного натурного эксперимента в Гренландском море, в частности, были выполнены оценки некоторых реальных ключевых деталей этой термодинамической системы. Из теории же следует (Булгаков, 1975), что в процессе зимнего конвективного перемешивания происходит «перекачка» значительных количеств тепла из его глубинных слоев к поверхности и затем в атмосферу за счет соответствующего компенсационного подъема более теплой и менее плотной глубинной воды. Считается, что за пределами СЛО эпизоды возникновения такого рода явлений наиболее известны в Северо-Европейском бассейне (Rudels et al., 2015). К числу основных кинематических свойств процесса плотностной конвекции в стратифицированном океане относится её ячеистая структура. Заметим, что зимой наличие ледяного покрова препятствует соответствующему поступлению тепла из океана в атмосферу за счет свободной вертикальной конвекции в СЛО (Зубов, 1956).

Известно также, что в пределах акватории собственно СЛО фактически единственная свободная ото льда морская поверхность, потенциально подходящая для возникновения на ней процесса глубокой зимней конвекции, может находиться в пределах арктических акваторий, известных под совокупным названием Великая Сибирская Польша (Колчак, 1909), а также других, существующих в СЛО в зимний период свободных от льда участков открытой воды (Захарова, 1996). Вся основная

территория СЛО в зимний период, как известно, покрыта сплошным припайным и весьма сплоченным дрейфующим льдом, препятствующим непосредственному, прямому взаимодействию океана с атмосферой, которое приводит, в частности, к возникновению глубокой плотностной конвекции.

Однако глубина моря в районах ВСП может оказаться неподходящей для наличия там теплого нижнего слоя атлантической воды. Кроме того, вопрос еще в том, что Великая Сибирская Полярная и иные, свободные от льда участки, в зимний сезон поверхности Арктического бассейна невелики по площади своей поверхности относительно размера всего СПО для того, чтобы природные процессы, происходящие в пределах открытых зимой водных пространств, могли оказать климатическое влияние на весь арктический регион. Тем не менее, такого рода пессимистическое предположение может быть достаточно убедительно опровергнуто имеющимися в нашем распоряжении результатами оценки влияния природных аномалий сравнительно небольшого, локального, масштаба на соответствующие процессы, имеющие планетарный характер. В данном случае имеется в виду сравнительно недавно обнаруженный эффект влияния междекадной осцилляции теплосодержания деятельного слоя Мирового океана (МОСТОК) в некоторых отдельных его регионах на климатические характеристики Северного полушария (Романов и др., 2019). Кроме того, заключение об ограниченности поверхностью только ВСП и нескольких сравнительно небольших участков пространства распространения процесса зимней плотностной конвекции в пределах СЛО требует дополнительной проверки с помощью специального анализа данных круглогодичных спутниковых наблюдений за состоянием его поверхности. Иначе говоря, возможное обнаружение помимо известных других свободных ото льда в зимний период года участков СЛО, будет иметь исключительное важное значение для развития сведений о климатологии данного региона. Кроме того, последующее выполнение в этих акваториях разведывательных гидрофизических съемок позволит существенно продвинуться в решении теоретических и прикладных задач, связанных с изменчивостью не только современного климата Арктики, но всего Северного полушария.

Некоторые принципиальные результаты, задачи и перспективы Российских исследований по гидрофизике Южного океана

Начало современных систематических исследований Южного океана отечественными океанологами восходит к осени 1955 г., когда советская Морская Антарктическая Экспедиция (МАЭ) на борту ее флагмана – дизель-электрохода «Обь» вышла из порта Калининград и направилась к берегам шестого ледового континента. Первую МАЭ возглавлял известный российский гидрофизик, директор Института океанологии АН СССР, профессор В.Г. Корт (Корт, 1967). В экспедиции были выполнены два эпохальных трансокеанских гидрофизических разреза: один – от шельфа Антарктиды до побережья Индии, второй – вдоль 20° в.д. от ле-

дового материка до Южной Африки. В течение нескольких последующих лет эти разрезы повторялись неоднократно, став для советской МАЭ фактически стандартными.

Анализ океанографических материалов советских антарктических экспедиций 60-х годов XX столетия позволил определить и описать основные черты гидрофизического режима Антарктического циркумполярного океана, все ключевые положения о котором впоследствии были проверены и подтверждены с помощью независимых измерений и расчетов (Атлас Антарктики, 1966).

Фронтальные зоны Южного океана

Основной климатической фронтальной зоной в классической океанографии Антарктики изначально считалась так называемая Антарктическая конвергенция (АК), иначе называемая Южным полярным фронтом (ЮПФ), принимавшимся некоторыми исследователями за условный маркер внешней географической границы антарктического региона (Mackintosh, 1946; Буйницкий, 1956; Ботников, 1963; Ботников, Короткевич, 1994). На стандартном разрезе «Оби» по 20° в.д. (а также на других аналогичных разрезах в той же широтной зоне (Григорьев, 1969)) этот фронт отчетливо прослежен в поле температуры воды верхнего слоя океана в районе 47° ю.ш. по характерному рисунку изотерм с прогибом вниз от его свободной поверхности.

В итоге данные исследований, полученные российской МАЭ в 1955–1958 гг., позволили сформулировать наиболее обоснованную парадигму образования фронтальных зон в океане (Иванов, 1959). Содержащееся в ней концептуальное теоретическое обоснование проблемы, общее для всего Мирового океана, прежде всего, учитывало специфические гидрофизические условия Южного океана, где на этой основе были обнаружены несколько крупномасштабных фронтальных зон различного происхождения. После обстоятельных публикаций результатов исследований, подобный предложенному нами подход к изучению проблем океанского фронтотенеза (Иванов, Нейман, 1965) был в той или иной мере успешно применен в большинстве работ по океаническим гидрофронтам, как со ссылками на первоисточник, так и без каких-либо упоминаний о нем (Грузинов, 1975; Степанов, 1967; Федоров, 1983). Кстати, весьма компетентное описание этого нетривиального подхода к изучению основ океанского фронтотенеза и оценка результатов его приложения к антарктическому региону содержится в недавно опубликованном обстоятельном обзоре В.М. Грузинова (Грузинов, 2019). Эта полезная публикация позволяет нам здесь обратить внимание только на узловые моменты этого метода анализа крупномасштабных полей свойств гидросферы АЦО, раскрывающие основные, климатические черты его гидрофизического режима.

В соответствии с общепринятой моделью рассматриваемого явления (Федоров, 1983), поддающийся визуальному, а, следовательно, и приборному описанию, след физического фронта в водной среде будет представлять собой некоторую

линию на горизонтальной плоскости, представленной изоповерхностью какого-либо свойства или характеристики состояния океанской воды. Поскольку в общем случае количественное выражение этого состояния подчиняется универсальному закону случайного распределения, нахождение линии фронта в двухмерном плане изменяется с течением времени, колеблясь в пределах некоторого пространственного интервала, называемого фронтальной зоной. Таким образом, в океанологии понятие фронт означает, условно говоря, ничто иное как актуальное мгновенное положение изолинии максимального горизонтального градиента какого-либо свойства морской воды. Фронтальная зона – условная аналитическая категория, ассоциируемая с некоторой областью в океане, виртуальное пространство которой определяется в статистическом смысле пределами дисперсии положения линии фронта. В границах фронтальной зоны заключено среднее положение фронта в соответствующем временном масштабе, определяемом задачей конкретного исследования. Отсюда напрашивается важный вывод о том, что в подавляющем большинстве случаев современной аналитической практики с использованием данных океанологических измерений, выполненных в пределах известных пространственно-временных масштабов, наиболее целесообразно использование понятия не о фронте, а о фронтальной зоне.

Создание наиболее адекватной и одновременно весьма компактной физической модели фронтальных зон Южного океана (Иванов, Нейман, 1965) было основано на определенном представлении о месте этих формирований в общей динамической структуре океана. Изначально рабочая гипотеза состояла в том, что если фронтальная зона определяется как район, в котором горизонтальный градиент океанографической характеристики имеет максимум, то напрашивался вывод о происхождении такой аномалии в полях рассматриваемых свойств морской воды не иначе, как под влиянием некоторых особенностей ее циркуляции. В свою очередь, принято считать, что аномалии свойств водных масс в условиях открытого океана в общем случае формируются под влиянием граничных условий, горизонтальной и вертикальной адвекции (конвекции) и турбулентной диффузии (Корт, 1967). Если в анализе крупномасштабных океанских процессов, к числу которых относится формирование океанских фронтальных зон, принять к сведению сравнительно плавное изменение в пространстве граничных условий, то они априори должны быть исключены из числа основных причин возникновения значительных локальных неоднородностей в полях гидрофизических характеристик. Турбулентная диффузия, играя основную роль в процессах перемешивания морской воды, сглаживает контрасты в распределениях всех ее свойств (Озмидов, 1968). Исходя из этих опорных предположений, был сделан принципиальный вывод о том, что основной причиной возникновения значительных градиентов свойств, характерных для фронтальных зон в условиях Южного океана, является некоторая универсальная особенность динамики его течений. Рассматривая горизонтальную адвекцию свойств морской воды как сумму ортогональных компонент этого переноса, отечественные океанологи одни из первых в середине прошлого столетия пришли к заключению об определяющей

роли меридиональной компоненты скорости течения в формировании максимальных горизонтальных градиентов свойств в пределах Южного океана. Получив соответствующее теоретическое наполнение и эмпирическое подтверждение своей актуальности, эта гипотеза оказалась весьма плодотворным исходным базисом для определения географического положения и описания термодинамической структуры всех основных «климатических» фронтальных зон Южного океана (Иванов, 1959).

Теоретическое обоснование было также дано известному эмпирическому соответствию между волнообразными колебаниями изолиний океанографических характеристик на разрезах и направлением вертикальной компоненты скорости течения. Этот сам по себе весьма важный результат в последующем позволил сформулировать концептуальное положение о существовании в океане двух основных типов фронтов и, соответственно, фронтальных зон, получивших условные названия динамических и гидрологических. В соответствии с данной теорией, динамические фронты в системе океанической циркуляции представлены линиями (зонами) конвергенции и дивергенции. Это такие районы в океане, где имеет место схождение или расхождение горизонтальных потоков, сопровождаемое соответствующим опусканием или подъемом воды в верхнем слое. Гидрологический (гидрохимический и пр.) фронт – это пространство океанской поверхности, в пределах которого горизонтальные градиенты скалярных океанографических характеристик (температура, соленость и т.д.) имеют локальный максимум. Рассматривая с учетом этих представлений различные варианты распределения океанографических характеристик на разрезах, построенных по данным прямых измерений, нетрудно было заметить, что параллельно линии динамического фронта с обеих его сторон располагаются фронты гидрологические. Отсюда последовала уточненная во втором приближении формулировка наиболее адекватного, на наш взгляд, понятия о физической сущности океанской фронтальной зоны (Нейман и др., 1997), основной смысл которой заключен в следующем.

Анализ и теоретическое обобщение данных отечественных океанографических исследований в 60-х гг. XX столетия в Антарктике позволил, в частности, сделать заключение о том, что понятие фронтальная зона должно означать один из ключевых системных элементов крупномасштабной динамической структуры океана. Гидрофизический режим в пределах фронтальной зоны определяется наличием в верхнем деятельном слое океана области максимальной вертикальной скорости, оконтуренной участками повышенных горизонтальных градиентов свойств морской воды (температура, соленость и т.д.). В системе общей циркуляции океана гидрологические фронты ассоциируются со стрежнями квазистационарных течений в приспособленных полях плотности. Если принять во внимание, что горизонтальная компонента скорости в поверхностном слое океана первична по отношению к вертикальной (Линейкин, 1957), то динамические фронтальные зоны следует рассматривать как неотъемлемый атрибут системы циркуляции, слагаемой крупномасштабными течениями, обладающими

существенной поперечной неоднородностью. Резче всего эта неоднородность проявляется при близком соседстве разнонаправленных течений, когда на границе между ними возникает зона наибольшей завихренности в поле скорости и, как следствие, усиливается вертикальная циркуляция. Под воздействием меняющихся граничных условий возникают изменения величины или знака вертикальной скорости в зоне ее экстремума – в динамической фронтальной зоне – приводят к соответствующему изменению наклонов изопикнических поверхностей, что отражается на скорости вдоль фронтального переноса. Таков, на наш взгляд, механизм взаимодействия динамических и термохалинных, а в более общем смысле, гидрологических (гидрофизических) факторов в океанских фронтальных зонах.

Названные выше специфические свойства полей океанографических характеристик в поверхностном слое Южного океана могут быть поставлены в соответствие с пространственно-временными параметрами возмущения скорости виртуального квазистационарного течения. Как известно (Озмидов, 1968), спектры этих колебаний обладают, по крайней мере, двумя отличительными особенностями – непрерывностью спектральной функции и наличием на ней нескольких основных максимумов в области межгодовых, сезонных, синоптических и других, более короткопериодных, колебаний. Если бы можно было построить пространственные спектры всех типов и масштабов фронтов, какие встречаются в реальном океане, то энергозначимые экстремумы спектральной функции в низкочастотной области, по всей вероятности, совпали бы с соответствующими особенностями спектральных характеристик океанской циркуляции. Следовательно, для выделения фронтальных зон с использованием массивов первичных данных гидрофизических наблюдений применимы те же пространственно-временные параметры фильтрации, что и при описании поля скорости течений соответствующих масштабов.

В итоге, с применением вышеописанного подхода в пределах Южного океана удалось выделить и описать четыре основные крупномасштабные фронтальные зоны. На рис. 1 приведена схема географического положения этих зон, определенных названным выше способом на квазимеридиональных разрезах МАЭ 1956–1958 гг. (Григорьев, 1969). По мере продвижения по условному меридиональному разрезу через АЦО с юга на север эти зоны располагаются в следующей последовательности:

– Антарктическая дивергенция (61–64° ю.ш.). Положение АД совпадает с ложбиной в динамическом рельефе изобарических поверхностей, разделяющей Антарктическое циркумполярное течение (Саруханян, 1980) восточного направления и западное Прибрежное течение (Максимов, 1958).

– Антарктическая конвергенция (48–51° ю.ш.). Формирование АК обусловлено, главным образом, наличием поперечной неоднородности квазизонального восточного переноса, доминирующего в наиболее высокоширотном регионе Южного океана. По своему географическому положению АК весьма близко совпадает с основным стрежнем южной ветви АЦТ (Гансон и др., 1977). Термохалинная структура АК имеет существенную особенность по сравнению с типовой схемой фронтальной зоны, приведенной на рис. 2. Вблизи АК более ярко выражен сопутствующий

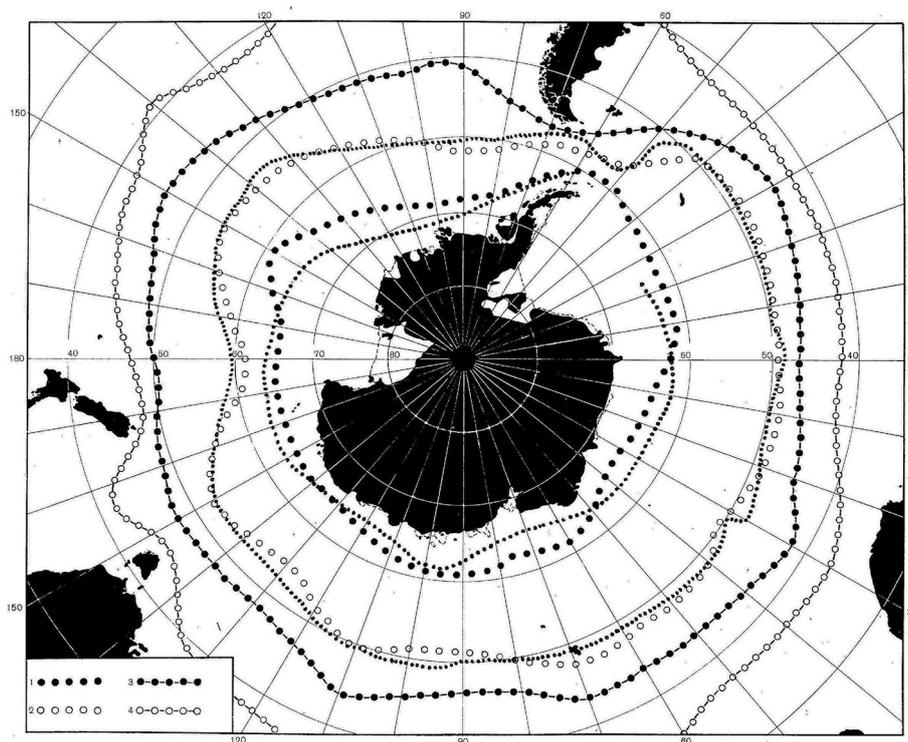


Рис. 1. Расположение основных квазистационарных динамических фронтальных зон в Южном океане по данным расчетов, выполненных в (Иванов, Нейман, 1965).

Условные обозначения: 1 – Антарктическая дивергенция; 2 – Антарктическая конвергенция; 3 – Субантарктическая дивергенция; 4 – Субтропическая конвергенция. Точечным пунктиром показано положение Антарктической дивергенции по (Deason, 1963) и Антарктической конвергенции по (Mackintosh, 1946).

гидрологический фронт, расположенный справа от динамического фронта. Нужно заметить, что конкретно эту, хорошо различимую в результатах гидрофизических съемок высоко градиентную зону, было изначально принято рассматривать в качестве основного аналитического маркера Южного Полярного фронта (Степанов, 1974).

– Субантарктическая дивергенция (42–45° ю.ш.). САД впервые была выделена Ю.А. Ивановым по косвенным признакам при расчете поля вертикальной скорости на основе данных о тангенциальном напряжении ветра на поверхности Южного океана (Иванов, 1959). На меридиональных разрезах океанологических характеристик определить положение САД не представляет больших трудностей. Тем не менее, большинство исследователей не выделяло САД в качестве отдельной фронтальной зоны. По-видимому, это было связано с неопределенностью обычного качественного подхода к оценке географического положения района дивергенции течений по ложбине динамического рельефа свободной поверхности океана.

– В состав фронтальных зон Южного океана входит также расположенная на его северной окраине Южная субтропическая конвергенция (~ 40° ю.ш.). В этой зоне наблюдается уменьшение температуры и солености с глубиной и противоположные меридиональные горизонтальные градиенты плотности воды в верхнем слое каждого из двух сопутствующих гидрологических фронтов. Изменение зна-

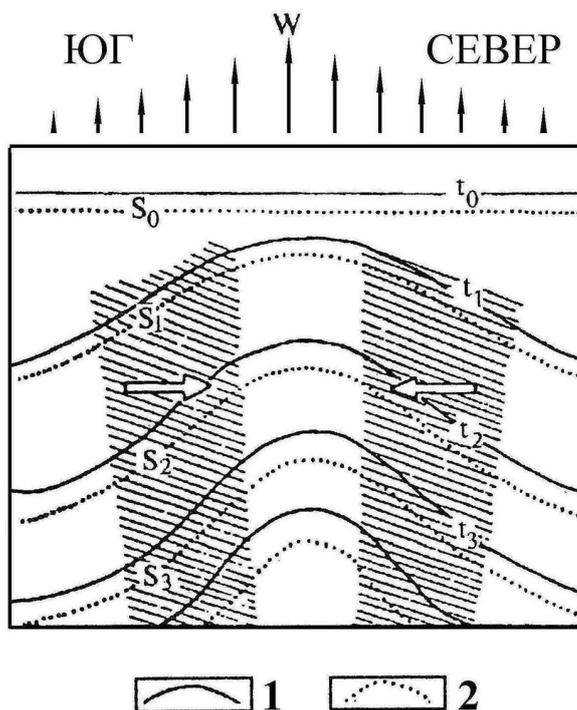


Рис. 2. Схема поперечного разреза термохалинной структуры фронтальной зоны в районе Антарктической дивергенции, соответственно модели (Иванов, Нейман, 1965).
 Условные обозначения: 1 – изотермы, 2 – изогалины; тонкими стрелками вверху рисунка показано распределение вертикальной скорости на нижней границе дрейфового слоя; заштрихованы зоны максимальных градиентов гидрологических характеристик; светлые стрелки – направление горизонтального градиента плотности в двух гидрологических фронтах, сопутствующих динамическому фронту – в данном случае дивергенции.

ка наклона уровенных поверхностей давления и плотности соответствует наличию здесь динамической границы между горизонтальными потоками противоположных направлений. Фронтальная зона ЮСТК находится на наиболее высокоширотной периферии северного стрежня АЦТ, являясь, по сути, естественной северной широтной границей Южного океана.

Целесообразно сравнить географическое положение перечисленных фронтальных зон по определениям разных авторов с помощью независимых методов. При этом особое место занимает вопрос о физической природе фронтальной зоны, связанной с Антарктической конвергенцией и ее отражении в полях океанографических характеристик, по которым определялось местоположение АК. До начала современных отечественных исследований в Южном океане в качестве главного критерия для аналитического выделения этой зоны принимался максимальный меридиональный градиент температуры на границе между районами с различной термохалинной структурой. Использование этого индекса до середины прошлого века давало возможность составить детальное представление о местоположении так называемого Южного Полярного фронта, иначе выдававшегося за Антарктическую конвергенцию, которую отождествляли в одних случаях с северной границей распространения придонной, а в других –

поверхностной антарктической водной массой. Но, как теперь можно убедиться, использование максимального градиента температуры как индикатора положения АК приводило лишь к определению места одного из двух гидрологических фронтов, сопутствующих зоне Антарктической конвергенции. В этой связи не должно показаться странным, что, несмотря на принципиальные отличия физических моделей океанских фронтальных зон, у большинства их исследователей в прошлом и в настоящем, географическое положение Антарктической конвергенции весьма близко совпадает (Иванов, Нейман, 1965). Это формальное совпадение обусловлено тем, что, в контексте приведенной в работе модели, расстояние между динамическим и гидрологическими фронтами в районе фронтальной зоны АК оказывается весьма небольшим, и при условном графическом изображении исследуемого феномена зоны этих фронтов фактически сливаются в одно целое.

В качестве общего для фронтальных зон Южного океана примера на рис. 2 приведена схема термохалинной структуры вод в районе Антарктической дивергенции, составленная с учетом модели (Иванов, Нейман, 1965) и данных соответствующих гидрологических наблюдений МАЭ (Григорьев, 1969). Принципиальная конструкция и содержание этой схемы являются подобными для всех четырех фронтальных зон, которые рассматриваются в настоящей статье. С тем лишь отличием, что для каждой конкретной зоны рисунок термохалинных полей и динамические индексы будут определяться типом динамического фронта – дивергенцией или конвергенцией. Соответственно, в верхней части данного рисунка тонкими стрелками показано условное распределение вертикальной скорости на нижней границе слоя трения в районе АД. Осевая область дивергенции горизонтальной скорости течений отмечена на схеме максимумом вертикальной скорости, который на реальном гидрологическом разрезе идентифицируется визуально по характерной геометрии изолиний свойств, в данном случае температуры и солености, – по их изгибу, направленному вверх. Косой штриховкой на рисунке показано положение гидрологических фронтов, формирующихся симметрично по обе стороны от динамического фронта (дивергенции либо конвергенции в поле горизонтальной скорости).

Великий Восточный Дрейф – Антарктическое Циркумполярное Течение

45 лет тому назад советским гидрофизикам удалось впервые в истории мировой океанографии инструментально зафиксировать Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) на протяжении его почти полного поперечного разреза. Это произошло в 1974–1975 гг. в экспедиции 10-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Вернадский», принадлежавшего Морскому Гидрофизическому институту АН УССР. Не вдаваясь в детали этого уникального исследования, сведения о котором в свое время были опубликованы в специальном сборнике (Гансон, Нейман, 1977), мы остановимся здесь лишь на нескольких принципиальных результатах этого, по-видимому, одного из немногих в своем роде успешного

натурного эксперимента по контактному измерению скорости АЦТ наиболее «абсолютным» из всех известных методом – с помощью якорных буйковых станций. До начала современных отечественных исследований Антарктики в специальной литературе можно было найти лишь весьма неоднозначные сведения о физической природе и термогидродинамических характеристиках Антарктического циркумполярного течения (Максимов, 1962). Если обратиться к соответствующим океанографическим публикациям еще первой половины прошлого века (Deacon, 1937; Sverdrup et al., 1942; Munk, Palmen, 1951), то в них можно найти основанные только на косвенных или теоретических оценках сведения об АЦТ, как о наиболее крупном звене системы общей циркуляции Мирового океана в южно-полярной области. Изначальные представления об АЦТ сводились к тому, что оно представляет собой обширный квазистационарный восточный перенос вод, сосредоточенный в широтной полосе между 40 и 60° ю.ш. с наименьшим поперечным сечением в проливе Дрейка (около 600 км). Оценки расхода этого течения у разных авторов могли различаться в несколько раз, но в среднем обычно приближались к величине 200 Св. Заметим, что во всех последующих по времени оценках порядок величины расхода АЦТ сохранялся неизменным, хотя по абсолютному значению у разных авторов она менялась в пределах 10–20% (Deacon, 1963; Fandry, Pyllsbury, 1979; Корт, 1963; Лебедев, 2019).

По материалам наблюдений советской Морской Антарктической экспедиции, дополненных данными всех предшествующих ей гидрологических измерений в АЦО, в 1961 г. была опубликована первая и в свое время наиболее детальная динамическая карта области Антарктического циркумполярного течения (Нейман, 1961). Эта карта, также, как и построенная вскоре после нее схема переноса вод в субполярном регионе Южного океана (рис. 3), дали наглядное представление о кольцевом, «замкнутом» вокруг южного полярного материка переносе вод в системе АЦТ (Корт, 1963). Как выяснилось в дальнейшем, сравнительно гладкий характер картины поля поверхностной скорости этого течения есть во многом результат среднесноголетнего осреднения данных наблюдений – процедуры, которая обычно применяется при расчёте подобных карт (Булатов, 1971). Впоследствии эти предварительные представления о структуре поля скорости АЦТ с помощью прямых измерений и более продвинутых модельных экспериментов удалось весьма кардинально уточнить и существенно дополнить. Из теоретических предположений сложилось представление о слабой вертикальной стратификации его водной толщи, способствующей проникновению АЦТ на значительную глубину (Бурков и др., 1973; Иванов, 1961). В связи с этим еще на начальной стадии исследований Южного океана возникала трудность в оценке абсолютной скорости АЦТ косвенными методами, в том числе в геострофическом приближении, которое, в частности, использовано и для расчета и построения карты переноса воды в АЦТ, приведенной на рис. 3.

Относительный характер распределения скорости, полученный без учета параметров реального течения на условной «нулевой» (отсчетной) поверхности,

приводил некоторых исследователей (Баранов, Корнилов, 1972; Трешников и др., 1972; Трешников и др., 1973) к предположению о существовании под основным потоком АЦТ его глубинного противотечения. Необходимость натурной экспериментальной проверки этого и многих других гипотез о структуре и динамике реального океана стала вполне очевидной ввиду необходимости совершенствования теории АЦТ (Каменкович, 1962) и методов его математического моделирования, в первую очередь, для решения актуальных задач по изменчивости современного климата Земли.

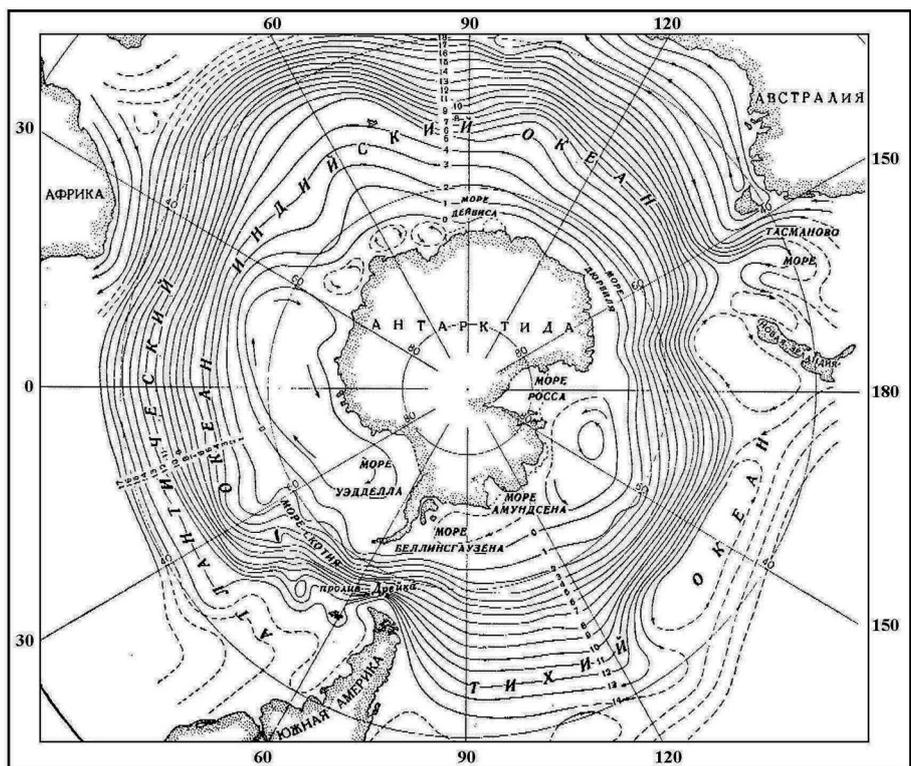


Рис. 3. Карта – схема переноса вод Антарктическим циркумполярным течением по данным (Корт, 1963). Расстояния между изолиниями соответствуют величине переноса в слое 0–3000 м, равной 10 Св ($10^6 \text{ м}^3/\text{сек}$).

Возвращаясь к результатам упомянутой в начале раздела экспедиции НИС «Академик Вернадский», напомним, что работа по исследованию поля скорости АЦТ была выполнена в январе–феврале 1975 г. на стандартном разрезе по 20° в. д. от 38° до 55° ю. ш. Регистрация скорости течений проводилась на 5 буйковых якорных многосуточных станциях, установленных в узловых точках динамической карты района работ, рассчитанной по данным предварительной гидрологической экспресс-съемки (Нейман, Смирнов, 1981). На рис. 4 приведена схема верхней части разреза зональных изотих, построенная на основе данных этой съемки. В результате предварительного расчета поля скорости в геострофическом приближении, можно было предположить, что в реально наблюдаемом в тот момент АЦТ уменьшение его скорости с глубиной происходит очень медленно, по-видимому, вследствие весьма слабой стратификации плотности воды в Южном океане. Более того, по данным

вычислений в некоторых участках разреза скорость практически не изменялась с глубиной на протяжении всего верхнего 1200-метрового слоя. Далее, совместный анализ результатов расчетов (рис. 4) и данных прямых измерений скорости (рис. 5) позволил выявить на фоне ее среднего для основной бароклинной толщи океана значения в 25 см /сек, существование нескольких стрежней, среднесуточная скорость в которых могла превышать 50, а мгновенная 100 см /сек. Существование мультиядерной, или многоструйной динамической структуры АЦТ, впервые обнаруженной в той экспедиции 1975 г., была затем повторно «открыта» (Бурков, 1994), а недавно сравнительно подробно исследована и описана на более современной научной основе (Тараканов, 2013).

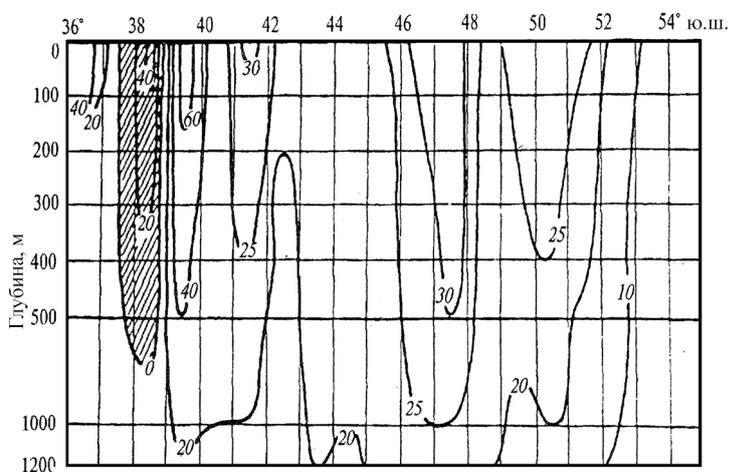


Рис. 4. Зональная компонента скорости течения на разрезе по 20° в.д. по данным расчета в геострофическом приближении (Нейман и др., 1997). Изоахи в см/сек – в среднесуточном осреднении, шкала глубины – в м. Положительные значения скорости соответствуют восточному направлению (в чертеж).

Прямыми инструментальными измерениями АЦТ зафиксирована еще одна специфическая особенность – наличие максимума восточной компоненты скорости в подповерхностном слое – на глубине около 100 м. Как видно на рис. 4, в одном из стрежней во время измерений средняя скорость течения на поверхности была ниже, чем во всем верхнем 1000-метровом слое. Это явный признак воздействия на поверхность океана тангенциального напряжения ветра, по-видимому, эпизодически изменяющего свое направление по отношению к преобладающему восточному направлению АЦТ. Как и в данных расчетов, так и на графиках вертикального распределения зональной компоненты инструментально измеренной скорости (рис. 5.) отчетливо проявляется ее медленное уменьшение с глубиной с тенденцией к нулевому значению в слое ниже 4000 м. Это явление вполне может восприниматься как почти явный признак отсутствия устойчивого противотечения под АЦТ, о котором в свое время велась активная дискуссия (Трешников и др., 1973). Тем не менее, в каждом отдельном случае следует уточ-

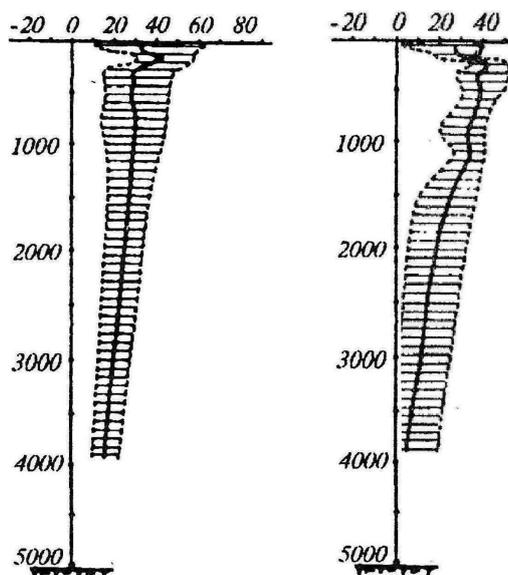


Рис. 5. Вертикальные профили зональной компоненты осредненной за несколько суток скорости Антарктического циркумполярного течения в его северной (слева) и южной (справа) главных струях по данным прямых измерений 1974 г. (Гансон и др., 1977).

Заштрихованы полосы разброса среднечасовых значений скорости.

нять корректность постановки вопроса о существовании этого противотечения в контексте конкретного временного масштаба исследуемого явления. Следовательно, в рамках данной работы необходимо уточнить, что противотечение под АЦТ инструментальным способом не было обнаружено при его исследовании в интервале времени от суток до синоптического масштаба. Появится ли оно в результате будущего аналогичного анализа многолетнего ряда подобных данных – время покажет.

Заключение

В крупномасштабной термодинамической структуре наиболее холодных на Земле Северного и Южного полярных океанов существенную климатическую роль играет глубинный слой воды, обладающий относительно наиболее высокой температурой. Есть основание полагать, что передача тепла этого слоя в атмосферу за счет глубокой зимней конвекции может влиять на развитие потепления климата, приводящее, в частности, к изменению ледовых условий в Арктике и в Антарктике.

Пространственно-временная изменчивость теплого глубинного слоя и его возможное термодинамическое взаимодействие с атмосферой в бассейне Северного Ледовитого океана изучены далеко недостаточно для того, чтобы можно было составить однозначное представление о климатических последствиях этого процесса. Одновременно возникает пока остающийся без ответа вопрос о том, может ли в принципе существовать такого же рода явление в регионе Южного океана. Пока есть лишь гипотеза о существовании конвективных процессов в аномально холодном антарктическом море Уэдделла, приводящих к формированию ан-

тарктической придонной водной массы. Имеются также сведения (Клепиков, 1963) о распространении до районов этой конвекции подповерхностной водной массы, тепло которой за счет данного процесса могло бы поступать в атмосферу. Дело осталось за малым – требуется направить океанологическую экспедицию в море Уэдделла и выполнить там соответствующий полноценный натурный эксперимент на современном научном уровне.

Примерно в такой же плоскости должен быть поставлен вопрос о современном представлении о характеристиках фронтальных зон Южного океана и пространственно-временной структуре АЦТ. Если обратиться к истории этого вопроса, то нетрудно убедиться, что за редким исключением абсолютное большинство публикаций на тему этих ключевых океанологических проблем (Саватюгин, 2004) основаны либо на простых умозрительных предположениях, или, в лучшем случае, на общих теоретических гипотезах. О том, что собой на самом деле представляет фронтальная зона в океане в реальном термодинамическом виде, мало что известно. Фактически единственным аргументом для ее распознавания на поверхности океана является лишь зримый контраст в полях океанографических характеристик. Вместе с тем, нелишне здесь еще раз напомнить, что в 1959 г. была сделана единственная реально адекватная теоретическая модель океанской фронтальной зоны, разработанная с учетом данных первых советских антарктических экспедиций 60-х годов XX века (Иванов, 1959). В настоящей статье коротко сказано о результатах применения этой модели при исследованиях фронтальных зон Южного океана. Использование этой модели дало возможность раскрыть причины, казавшейся почти мистической привязанности зон повышенной биологической продуктивности океана к районам с большими горизонтальными градиентами скалярных океанографических характеристик – главным образом температуры. Попытки объяснить данный феномен особой физиологической реакцией морских организмов на резкие перепады условий водной среды оказались безрезультатными. Единственное реальное объяснение было получено Ю.А. Ивановым с помощью его модели фронтальной зоны, в термодинамической структуре одного из двух типов которой должна существовать зона подъема глубинной воды (дивергенция скорости течения), богатой биогенными элементами. Большое практическое значение такого замечательного теоретического результата трудно переоценить. Но все ли в природе на самом деле происходит так, как говорит теория? Хотим мы того или нет, но это может и должна показать только практика. С тех прошло уже 60 лет, но за это время, к сожалению, ни у нашей стороны, ни за рубежом пока не нашлось возможности проведения специального натурального эксперимента по тестированию этой модели в реальных океанских условиях. Надо надеяться, что дальнейшее успешное развитие отечественных исследований в высокоширотных регионах Мирового океана поможет в ближайшем будущем решить и эту очередную океанографическую задачу.

Содержание статьи соответствует Госзаданию № 0128-2019-0008.

Литература

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Харланенкова Н.Е.* Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Европейские издания, 2011. С. 3–25.
- Алексеев Г.В., Родионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 32–42.
- Атлас Антарктики. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 236 с.
- Баранов Г.И., Корнилов Н.А.* Существует ли циркумполярное противотечение? // Инф. бюллетень САЭ. 1972. № 84. С. 58–60.
- Ботников В.Н.* Географическое положение зоны Антарктической конвергенции в Южном океане // Инф. бюллетень САЭ. 1963. № 4. С. 17–23.
- Ботников В.Н., Короткевич В.С.* Основные фронтальные зоны в океанах Южного полушария // Инф. Бюллетень САЭ. 1994. № 118. С. 10–16.
- Буйницкий В.Х.* Антарктическая конвергенция как физико-географическая граница Антарктики // Вестник Лен. Университета. 1956. Сер. геолог.-геогр. № 24. Вып. 4. С. 28–32.
- Булатов Р.П.* Циркуляция вод Атлантического океана в различных пространственно-временных масштабах // Океанологические исследования. 1971. № 22. С. 7–93.
- Булгаков Н.П.* Конвекция в океане. М.: Наука, 1975. 372 с.
- Бурков В.А., Булатов Р.П., Нейман В.Г.* Крупномасштабные черты циркуляции вод Мирового океана // Океанология. 1973. Т. 13. Вып. 3. С. 395–403.
- Бурков В.А.* Антарктические струи // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 167–169.
- Гансон П.П., Нейман В.Г.* Исследования экспедиций 10-го и 11-го рейсов НИС «Академик Вернадский» // Комплексные исследования МГИ АН УССР в Индийском океане. Севастополь: Изд. МГИ АН УССР, 1977. С. 8–18.
- Гансон П.П., Кривошея В.Г., Нейман В.Г., Тарасенко В.М.* Новые данные об Антарктическом циркумполярном течении // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 3. С. 473–475.
- Григорьев Ю.А.* Гидрологические исследования // Труды Сов. Антарктической. Экспедиции. Т. 49. Л.: Изд. Морской транспорт, 1969. 141 с.
- Грузинов В.М.* Фронтальные зоны Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 198 с.
- Грузинов В.М.* О физических и динамических фронтах в океане // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 100–107.
- Захарова В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 121 с.
- Зубов Н.Н.* О льдах Арктики и Антарктики. М.: Изд. МГУ, 1956. 118 с.
- Иванов В.В., Ретина И.А.* Влияние сезонной изменчивости атлантической воды на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 73–82.
- Иванов Ю.А., Нейман В.Г.* Фронтальные зоны Южного океана // Антарктика. М.: Наука, 1965. С. 98–109.
- Иванов Ю.А.* Положение и сезонная изменчивость фронтальных зон в Антарктике // Доклады АН СССР. 1959. Т. 129. № 4. С. 777–780.
- Иванов Ю.А.* Горизонтальная циркуляция вод Индийского сектора Антарктики // Океанологические исследования. 1961. № 3. С. 5–29.
- Каменкович В.М.* К теории Антарктического циркумполярного течения // Труды ИО АН. 1962. Т. 56. С. 241–293.

Нейман В.Г.

- Клепиков В.В.* Гидрология моря Уэдделла // Труды Сов. Антарк. Экспед. 1963. Т. 17. С. 45–93.
- Колчак А.В.* Льды Карского и Сибирского морей // Записки Рос. Акад. Наук. 1909. Т. 26. № 1.
- Корт В.Г.* Водобмен Южного океана // Океанологические исследования. 1963. № 8. С. 5–16.
- Корт В.Г.* О генезисе фронтальных зон в Южном океане // Бюллетень САЭ. 1967. № 5. С. 4–9.
- Лебедев К.В.* Модельные исследования ветрового вклада в межгодовую изменчивость расхода Антарктического циркумполярного течения южнее Австралии // Океанологические исследования. 2019. Том 47. № 2. С. 172–182. DOI: 1029006/1564-2281. JOR-2019.47(2)10.
- Линейкин П.С.* Основные вопросы динамической теории бароклинного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 139 с.
- Максимов И.В.* К изучению западного прибрежного антарктического течения // Информ. Бюлл. САЭ. 1958. № 2. С. 18–27.
- Максимов И.В.* О природе Великого восточного дрейфа // Информ. Бюлл. САЭ. 1962. № 32. С. 3–10.
- Нейман В.Г.* Динамическая карта Антарктики // Океанологические исследования. 1961. № 3. С. 117–123.
- Нейман В.Г., Смирнов Г.В.* Термохалинная и динамическая структура Антарктического циркумполярного течения // Комплексные исследования Индийского океана. Севастополь: Изд. МГИ АН УССР, 1981. С. 140–150.
- Нейман В.Г., Бурков В.А., Щербинин А.Д.* Динамика вод Индийского океана. М.: Научный мир, 1997. 232 с.
- Озмидов Р.В.* Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М.: Наука, 1968. 200 с.
- Папанин И.Д.* Жизнь на льдине. М.: Правда, 1938. 222 с.
- Романов Ю.А., Нейман В.Г., Бышев В.И., Серых И.В., Сонечкин Д.М., Гусев А.В., Кононова Н.К., Пономарев В.И., Сидорова А.Н., Фигуркин А.Л., Анисимов М.В.* Общая оценка статистической значимости и климатической роли глобальных атмосферных и океанических осцилляций // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 76–99.
- Саватюгин Л.М.* Российская наука в Антарктике. М.: Изд. Дом Городец, 2004. 304 с.
- Саруханян Э.И.* Структура и изменчивость Антарктического циркумполярного течения. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 122 с.
- Степанов В.Н.* Структурные зоны Мирового океана // Океанология. 1967. Т. 7. Вып. 3. С. 380–390.
- Степанов В.Н.* Мировой океан. Динамика и свойства вод. М.: Знание, 1974. 255 с.
- Тараканов Р.Ю.* Тонкая структура струй Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка // Прикосновение к океану. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. С. 41–53.
- Трешников А.Ф., Шамонтьев В.Л., Григорьев Ю.А., Белинская Л.А.* Сезонная и многолетняя изменчивость гидрологических элементов на разрезе по 20° в.д. // Проблемы Арктики и Антарктики. 1972. Вып. 39. С. 11–24.
- Трешников А.Ф., Баранов Г.И., Корнилов Н.А.* Циркумполярное противотечение Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 1973. Вып. 43–44. С. 9–18.
- Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- Deacon G.E.R.* The hydrology of the Southern ocean // Discovery Reports. Cambridge. 1937. Vol. 15. 221 p.

- Deacon G.E.R.* The Southern ocean // *The Sea*. 1963. Vol. 2. N.Y. 182 p.
- Defant A.* *Physical Oceanography*. Oxford. Pergamon Press, 1961. 729 p.
- Fandy C., Pillsbury R.D.* On the estimation of absolute volume transport applied to Antarctic Circumpolar Current // *Journ. Phys. Oceanography*. 1979. Vol. 9. No. 5. P. 449–455.
- Houtman T.* Surface temperature gradients at Antarctic Convergence // *New Zeal. Journ. of Geol. and Geoph.* 1964. Vol. 7. No. 2. P. 48–56.
- Ivanov V.V., Alexeev G.V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A.* Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback // *Journ. Phys. Oceanogr.* 2016. No. 46. P. 1437–1456. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Mackintosh N.A.* The Antarctic Convergence and the Distribution of Surface Temperature in Antarctic Waters // *Discovery Reports*. Cambridge. 1946. Vol. 23. P. 179–212.
- Munk W.H., Palmen N.* Notes on the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current // *Tellus*. 1951. Vol. 3. No. 1. P. 18–26.
- Rudels B., Korhonen M., Schauer U., Pisarev S., Rabe B., Wisotzki A.* Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget // *Progress in Oceanography*. 2015 (March). Vol. 132. P. 128–152.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.* *The Oceans...* 1942. Wash.: Prentice Hall., Inc. 523 p.

TO THE PROJECTS AND CHALLENGES OF DOMESTIC HYDROPHYSICAL STUDY OF THE GLOBAL OCEAN'S POLAR REGIONS

Neiman V.G.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: vneiman2007@yandex.ru
Submitted 15.01.2020, accepted 30.03.2020*

One of the climatically significant, but the poor studied hydrophysical factor in the polar regions of the world ocean is the subsurface layer of relatively warm seawater of subtropical origin. In the Arctic Ocean, this layer is associated with the waters of the Gulfstream, the high-latitude continuation of which in the form of a spur of the North Atlantic current penetrates into the Arctic basin, where it sinks to the depth of its density and spreads throughout its vast space in the layer of 100–900 m. The existence of a subsurface layer with an anomalous inversion vertical profile of water temperature also occurs in the Southern ocean. The article discusses the problem of monitoring the dynamics of this layer and obtaining data from a field experiment on its interaction with the atmosphere in the context of the to-day climate change of the Arctic and Antarctic. There is a reason to hope that the planned development of modern Russian scientific research in the polar regions of the world ocean will help to solve this important climatic problem. The paper presents some key results of this kind of domestic oceanological studies of the mid-twentieth century, which made a significant contribution to the theory and experiment related to the dynamics of the Southern ocean.

Keywords: Arctic, Antarctic, Northern Polar Ocean, Southern Ocean, frontal zone, temperature, salinity, convergence, divergence, current, polynya, convection, climate

Acknowledgments: This work was funding by State assignment No. 0128-2019-0008.

References

- Alekseev G.V., Ivanov N.E., Pniushkov A.V., and Harlanenkova N.E.* Klimaticheskie izmeneniya v morskoy Arktike v nachale XXI veka (Climate change in Arctic basin at the beginning of the XXI century). *Meteorologiceskie i geofizicheskie issledovaniya*, Moscow: Evropeiskie izdaniya, 2011, pp. 3–25.
- Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., and Harlanenkova N.E.* Izmenenie klimata Arktiki pri globalnom potepnenii (Climate change in Arctic during the global heating). *Problemi Arktiki i Antarktiki*, 2015, No. 1 (103), pp. 32–42.
- Atlas Antarktiki (Atlas of Antarctic). Vol. 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 236 p.
- Baranov G.I. and Kornilov N.A.* Suschestvuet li circumpoliarnoye protivotechenie? (Does circumpolar countercurrent exist?). *Inf. Biuliten SAE*, 1972, No. 84, pp. 58–60.
- Botnikov V.N.* Geograficheskoe polozenie zoni Antarkticheskoy konvergentsii v Yuznom okeane (Geographical position of Antarctic convergence zone in the Southern Ocean). *Inf. Biuliten SAE*, 1963, No. 4, pp.17–23.
- Botnikov V.N. and Korotkevich V.S.* Osnovnie frontalnie zoni v okeanah yuznogo polushariya (The main frontal zones in oceans of the southern hemisphere). *Inf. Biuliten SAE*, 1994, No. 118, pp.10–16.
- Buinitiski V.H.* Antarkticheskaya konvergenciya kak fiziko-geograficheskaya granitsa Antarktiki (Antarctic Convergence as a physical-geographical boundary of Antarctic). *Vestnik Len. Universiteta, ser. geolog.-geogr.*, 1956, No. 24, Vol. 4, pp. 28–32.
- Bulatov R.P.* Cirkuliatsiya vod Anlanticheskogo okeana v razlichnih prostranstvenno-vremennih masshtabah (Circulation of Atlantic Ocean in different spatial-temporal scales). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1971, No. 22, pp. 7–93.
- Bulgakov N.P.* Konvektsiya v okeane (Konvection in ocean). Moscow: Nauka, 1975, 372 p.
- Burkov V.A., Bulatov R.P., and Neiman V.G.* Krupnomasshtabnie cherty cirkuliatsii vod Mirovogo okeana (Large-scale features of the Global Ocean circulation). *Okeanologiya*, 1973, Vol. 13, No. 3, pp. 395–403.
- Burkov V.A.* Antarkticheskie strui (Antarctic strings). *Okeanologiya*, 1994, Vol. 34, No. 2, pp. 167–169.
- Deacon G.E.R.* The hydrology of the Southern ocean. *Discovery Reports*, Cambridge: 1937, Vol. 15, 221 p.
- Deacon G.E.R.* The Southern Ocean. *The Sea*, 1963, Vol. 2, N.Y., 182 p.
- Defant A.* Physical Oceanography. Oxford: Pergamon Press, 1961, 729 p.
- Fandy C. and Pillsbury R.D.* On the estimation of absolute volume transport applied to Antarctic Circumpolar Current. *Journ. Phys. Oceanography*, 1979. Vol. 9, No. 5, pp. 449–455.
- Fedorov K.N.* Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov (Physical origin and structure of oceanic fronts). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 296 p.
- Houtman T.* Surface temperature gradients at Antarctic Convergence. *New Zeal. Journ. of Geol. and Geoph.*, 1964, Vol. 7, No. 2, pp. 48–56.
- Ganson P.P. and Neiman V.G.* Issledovaniya ekspeditsiy 10-go i 11-go reisov NIS “Akademik Vernadskiy” (Investigations in 10-th and 11-th cruises of R/V “Akademic Vernadskiy”). Kompleksnie issledovaniya MGI AN USSR v Indijskom okeane, Sevastopol, 1977, pp. 8–18.
- Ganson P.P., Krivosheia V.G., Neiman V.G., and Tarasenko V.M.* (Novie dannie ob Antarkticheskome circumpoliarnom techenii (New data on Antarctic circumpolar current). *Dokladi AN SSSR*, 1977, Vol. 288, No. 3, pp. 473–475.
- Grigoriev Yu.A.* Gidrologicheskie issledovaniya (Hydrological investigations). *Trudi Sov.*

- Antarkticheskoy Ekspedicii*, Leningrad: Izd. Morskoy transport, 1969, Vol. 49, 141 p.
- Gruzinov V.M. Frontalnie zoni Mirovogo okeana (Frontal zones of the Global ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 198 p.
- Gruzinov V.M. O fizicheskikh i dinamicheskikh frontah v okeane (On physical and dynamical fronts in ocean), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 100–107.
- Ivanov V.V., Alexeev G.V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., and Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback. *Journ. Phys. Oceanogr.*, 2016, No. 46, pp. 1437–1456, doi: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Ivanov V.V. and Repina I.A. Vliyanie sezonnoy izmenchivosti atlanticheskoy vodi na ledianoy pokrov Severnogo Ledivitogo okeana (An influence of seasonal change of Atlantic water on ice cover of Arctic Polar Ocean). *Izvestiya RAN, seriya fizika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 73–82.
- Ivanov Yu.A. and Neiman V.G. Frontalnie zoni Yuznogo okeana (Frontal zones of Southern Ocean). *Antarctica*, Moscow: Nauka, 1965, pp. 98–109.
- Ivanov Yu.A. Polozenie i sezonnaya izmenchivost frontalnih zon v Antarktike (A spacing and seasonal change of frontal zones in Antarctic). *Doklady AN SSSR*, 1959, Vol. 129, No. 4, pp. 777–780.
- Ivanov Yu.A. Gorizontalnaya circuliatsiya vod Indiyского sektora Antarktiki (Horizontal circulation in Indian sector of Antarctic). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1961, No. 3, pp. 5–29.
- Kamenkovich V.M. K teorii Antarkticheskogo circumpoliarnogo techeniya (To the theory of the Antarctic circumpolar current). *Trudi IO AN*, 1962, Vol. 56, pp. 241–293.
- Klepikov V.V. Gidrologiya moria Ueddella (Hydrology of the Ueddell Sea). *Trudi Sov. Antark. Eksped.*, 1963, Vol. 17, pp. 45–93.
- Kolchak A.V. Ldi Karskogo i Sibirskogo morey (Ice of Kara and Siberian Seas). *Zapiski Ross. Acad. Nauk*, 1909, Vol. 26, No. 1.
- Kort V.G. Vodoobmen Yuznogo okeana (Water exchange of the Southern ocean). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1963, No. 8, pp. 5–16.
- Kort V.G. O genezise frontalnih zon v Yuznom okeane (On the frontal zones genesis in the Southern Ocean). *Biulleten SAE*, 1967, No. 5, pp. 4–9.
- Lebedev K.V. Modelnie issledovaniya vetrovogo vklada v mezgodovuyu izmenchivost rashoda Antarkticheskogo circumpoliarnogo techeniya yuznee Avstralii (Simulations of wind part in the interannual variability of the Antarctic circumpolar current transport to the South of Australia). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 172–182, doi: 10.29006/1564-2281. JOR-2019.47(2)10.
- Lineikin P.S. Osnovnie voprosi dinamicheskoy teorii baroklinnogo moria (The key problems of the baroclinic sea theory). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 139 p.
- Mackintosh N.A. The Antarctic Convergence and the Distribution of Surface Temperature in Antarctic Waters. *Discovery Reports*, Cambridge, 1946, Vol. 23, pp. 179–212.
- Maximov I.V. K izucheniyu zapadnogo pribreznogo antarkticheskogo techeniya (To the study of western off shore Antarctic current). *Biulleten SAE*, 1958, No. 2, pp. 18–27.
- Maximov I.V. O prirode Velikogo vostochnogo dreifa (On origin of the Great Eastern Drift). *Biulleten SAE*, 1962, No. 32, pp. 3–10.
- Munk W.H. and Palmén N. Notes on the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current. *Tellus*, 1951, Vol. 3, No. 1, pp. 18–26.
- Neiman V.G. Dinamicheskaya karta Antarktiki (Dynamic map of Antarctic). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1961, No. 3, pp. 117–123.
- Neiman V.G. and Smirnov G.V. Termohalinnaya i dinamicheskaya struktura Antarkticheskogo

- circumpoliarnogo techeniya (Termohalinal and dynamical structure of the Antarctical circumpolar current). Kompleksnie issledovaniya Indiysskogo okeana, Sevastopol: MGI AN USSR, 1981, pp. 140–150.
- Neiman V.G., Burkov V.A., and Scherbinin A.D.* Dinamika vod Indiysskogo okeana (Dynamics of the Indian ocean waters), Moscow: Nauchny mir, 1997, 232 p.
- Ozmidov R.V.* Gorizontalnaya turbulrntnost I turbulentniy obmem v okeane (Horizontal turbulence and turbulent exchange in ocean). Moscow: Nauka, 1968, 200 p.
- Papanin I.D.* Zizn na ldine (Life on ice-floe). Moscow: Izd. "Pravda", 1938, 222 p.
- Romanov Yu.A., Neiman V.G., Byshev V.I., Serykh I.V., Sonechkin D.M., Gusev A.V., Kononova N.K., Ponomarev V.I., Sidorova A.N., Figurkin A.L., and Anisimov M.V.* Obschaya ocenka statisticheskoy znachimosti I klimaticheskoy roli globalnih atmosfernih I okeanicheskikh oscilliatsiy (General assessment of statistical valuation and climatic part of the global atmospheric and oceanic oscillations). *Okeanologicheskije issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 2, pp.76–99.
- Rudels B., Korhonen M., Schauer U., Pisarev S., Rabe B., and Wisotzki A.* Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget. *Progress in Oceanography*, 2015, Vol. 132, pp. 128–152.
- Savatiugin L.M.* Rossiyskaya nauka v Antarktike (Russian Science in Antarctic). Moscow: Izd. Dom Gorodets, 2004, 304 p.
- Sarukhanian E.I.* Structura i izmenchivost Antarkticheskogo cirkumpoliarnogo techenia (Structure and variability of the Antarctic circumpolar current). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 122 p.
- Stepanov V.N.* Strukturnie zoni Mirovogo okeana (Structural zones of the World Ocean). *Okeanologiya*, 1967, Vol. 7, No. 3, pp. 380–390.
- Stepanov V.N.* Mirovoy ocean. Dinamika i svoistva vod (The World Ocean. Dynamics and water features). Moscow: Znanie, 1974, 255 p.
- Tarakanov R.Yu.* Tonkaia struktura struy Antarkticheskogo cirkumpoliarnogo techeniya v prolive Dreika (Thin structure of Antatrctic circumpolar current strings in the Drake passage). Prikosnovenie k okeanu, Moscow; Izevsk: Institut kompyuternih issledovaniy, 2013, pp. 41–53.
- Treshnikov A.F., Shamontev V.L., Grigoriev Yu.A., and Belinskaya K.A.* Sezonnaya i mnogoletniaya izmenchivost gidrologicheskikh elementov na razreze po 20°v.d. (Seasonal and multi-annual variations of the hydrological elements on 20° east section). *Problemi Arktiki i Antarktiki*, 1972, Vol. 3, pp. 11–24.
- Treshnikov A.F., Baranov G.I., and Kornilov N.A.* Cirkumpoliarnoe protivotechenie Yuznogo okeana (Circumpolar countercurrent in the Southern Ocean). *Problemi Arktiki i Antarktiki*, 1973, Vol. 43–44, pp. 9–18.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., and Fleming R.H.* The Oceans...1942. Wash.: Prentice Hall., 523 p.
- Zakharova V.F.* Morskie ldi v klimaticheskoy systeme (Marine ice in climatic system). Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996, 121 p.
- Zubov N.N.* O ldah Arktiki i Antarktiki (On ice of Arctic and Antarctic). Moscow: Izd. MGU, 1956, 118 p.