

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЮЖНОГО ОКЕАНА ПО НАУЧНЫМ
ПРОГРАММАМ ААНИИ: ОТ ПРОГРАММЫ «ПОЛЭКС-ЮГ»
ДО ФЦП «МИРОВОЙ ОКЕАН»**

*ст. научн. сопр. Н.Н. АНТИПОВ, канд. физ.-мат. наук А.И. ДАНИЛОВ,
канд. физ.-мат. наук А.В. КЛЕПИКОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: klep@aari.ru

Выдающаяся роль А.Ф. Трёшников в организации советских исследований Антарктики хорошо известна. Достаточно вспомнить о том, что в 1956—1958 гг. он возглавлял Вторую комплексную антарктическую экспедицию (КАЭ). Десятки раз на время зимовки на станции Мирный на вездеходах, тракторах, самолетах он проникал в глубь Антарктиды, открыл станции Комсомольская и Восток. Став в 1961 г. директором Арктического и антарктического научно-исследовательского института, А.Ф. Трёшников продолжал лично заниматься исследованиями Антарктики. В 1963—1964 гг. он возглавил перелет самолетов Ил-18 из Москвы в Антарктиду, где участвовал в создании станции Молодежная.

В 1967—1968 гг. А.Ф. Трёшников возглавлял 13-ю САЭ на д/э «Обь», совершившем под его руководством кругосветное плавание в высоких широтах. На острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), расположенном в группе Южных Шетландских островов, была открыта антарктическая научная станция Беллинсгаузен. В мае 1973 г. А.Ф. Трёшников в четвертый раз морем отправился в Антарктику, где возглавил работы по выводу из ледового плена д/э «Обь», зажатого льдами в прибрежной зоне близ Антарктиды.

Вместе с тем, велика роль А.Ф. Трёшников в организации научных исследований в Антарктике, и прежде всего в исследованиях Южного океана.

Систематические экспедиционные исследования Южного океана были начаты нашей страной в 1956 г. в рамках Первой комплексной антарктической экспедиции, созданной для проведения работ в Антарктике по программе Международного геофизического года (МГГ). В период подготовки и проведения МГГ (летне-осенние сезоны 1956—1958 гг.) был выполнен большой объем океанографических наблюдений (около 500 глубоководных гидрологических станций). С окончанием МГГ объем океанографических наблюдений, проводившихся в рамках Советской антарктической экспедиции, значительно сократился, однако гидрологические и ледовые наблюдения с целью дальнейшего накопления натуральных данных проводились при каждой возможности.

Океанографические наблюдения, выполненные на судах Советской антарктической экспедиции в период 1956—1963 гг., а также полученные в разные годы материалы наблюдений зарубежных экспедиций стали основой для подготовки обширного раздела «Воды и льды Южного океана» в Атласе Антарктики, первый том которого был опубликован в 1966 г., а второй — в 1969 г. (Атлас Антарктики, 1966, 1969). Руководство подготовкой к печати Атласа Антарктики и частичная разработка различных графических материалов осуществлялись сотрудниками антарктическо-

го отдела института, который возглавлял А.Ф. Трёшников. За грандиозный труд по подготовке этого уникального научного издания он вместе с другими авторами был удостоен Государственной премии СССР.

Атлас Антарктики представляет собой первое наиболее крупное и значимое обобщение материалов многолетних исследований природы Антарктики. В нем нашли отражение значительно изменившиеся на базе новой информации наши представления о природных явлениях Южного океана. В частности, были уточнены основные особенности пространственного распределения гидрологических элементов в океане, определены области распространения основных водных масс. Выделены новые окраинные моря Антарктики: Лазарева, Содружества, Рисер-Ларсена, Космонавтов, Моусона и Сомова. Построена более полная и совершенная схема циркуляции вод, а в циркуляции до этого почти не изученных антарктических вод была обнаружена серия окружающих континент стационарных циклонических круговоротов, наиболее обширными из которых являются круговороты Уэдделла и Росса. В ледовом поясе, окружающем Антарктиду, были выделены три наиболее крупных ледяных массива: Атлантический, Тихоокеанский и Балленский.

Экспедиционные исследования Южного океана заметно активизировались в конце 1960-х годов, когда был создан научно-исследовательский флот руководимого А.Ф. Трёшниковым Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Начиная с первых рейсов, научно-исследовательские суда «Профессор Визе» и «Профессор Зубов» проводили обширные наблюдения за океаном, атмосферой и ледовым покровом в соответствии с научными программами, которые составлялись с учетом маршрутов судов по обеспечению антарктических станций и на основе представлений о гидрологическом режиме соответствующих районов Южного океана. Основная цель программы заключалась в увеличении объема данных наблюдений и расширении представлений о режиме вод и льдов этих регионов.

Заметно возросшие возможности судов по проведению широкого спектра наблюдений за океаном, атмосферой и ледовым покровом и осмысление накопленных данных привели к осознанию необходимости комплексного исследования природной среды антарктической области. В связи с этим в 1970-е годы начался качественно новый этап изучения Южного океана, и связан он с разработанной под руководством А.Ф. Трёшникова программой исследований полярных областей Земли.

Еще в 1968 г. была создана программа проведения Натурного эксперимента по проблеме взаимодействия океана и атмосферы (НЭВ) (Трёшников и др., 1968), эта программа была включена в Программу исследований глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) в виде подпрограммы под названием «Полярный эксперимент» (ПОЛЭКС). В 1971 г. на конференции стран — участниц ПИГАП программа ПОЛЭКС была принята и стала международной.

В качестве главной задачи программы, в рамках которой решено было планировать и проводить наблюдения в полярных областях Земли, была поставлена задача количественной оценки роли атмосферы и океана в формировании их энергетического баланса. Кроме того, программа «ПОЛЭКС» предусматривала исследование проблем, связанных с крупномасштабным взаимодействием атмосферы и океана в полярных областях Земли, и изучение механизмов, которые формируют крупномасштабные долгопериодные изменения гидрометеорологических процессов в Арктике и Антарктике.

Осуществление теоретических и экспериментальных работ по программе ПОЛЭКС началось в 1971—1972 гг. Целью работ были изучение энергетики атмосферных процессов, разработка теоретических основ для гидродинамического моделирования атмосферной циркуляции и проведение научно-методических работ с научно-исследовательских судов на специальных полигонах. В этот период исследования проводились на полигонах Северной Атлантики, где изучалась статистическая пространственно-временная структура основных гидрофизических полей, мезо- и макроструктура гидрофизических полей, а также механизмы взаимодействия атмосферы и океана с помощью специальной аппаратуры, предназначенной для определения составляющих теплового баланса.

Одновременно стала очевидной необходимость получения информации о крупномасштабных процессах, протекающих на акватории океана. Поэтому на первый план выдвинулись задачи крупномасштабных долговременных натуральных экспериментов, осуществление которых началось в 1974 г. в Северной Атлантике и северной части Тихого океана. В экспедиционных исследованиях, проводимых на научно-исследовательских судах, основной задачей стало изучение пространственно-временной структуры центров действия океана и очагов взаимодействия атмосферы и океана, локализованных в этих районах. Важным шагом в развитии этих исследований стало запланированное на 1975 г. начало реализации натурального эксперимента по изучению структуры и динамики Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), который стал составной частью программы «ПОЛЭКС-Юг».

Применительно к Южному океану задачи программы были сформулированы следующим образом (Трёшников, 1973; Трёшников и др., 1973а, 1973б):

- 1) исследования структуры и динамики Антарктического циркумполярного течения как звена общей циркуляции Мирового океана;
- 2) изучение механизмов формирования антарктической донной воды (АДВ) и ее роли в глобальной циркуляции океана;
- 3) изучение массо- и энергообмена между океаном и атмосферой при их взаимодействии в Южном океане;
- 4) изучение роли криосферы и температуры морской поверхности в циркуляции атмосферы над Южным полушарием;
- 5) изучение закономерностей зонального и меридионального энергообмена в атмосфере Южного полушария;
- 6) исследование физических механизмов, ответственных за изменения климата (аэрозоль, CO_2 , O_3 , космогеофизические факторы).

Основное содержание программы составила совокупность целенаправленных натуральных экспериментов для комплексного изучения океанических и атмосферных процессов с целью решения проблем динамики и термике вод Южного океана. Основная цель программы ПОЛЭКС — изучение крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в полярных областях, их роли в формировании энергетического баланса системы атмосфера — океан и механизмов, формирующих долгопериодные изменения гидрометеорологических процессов в Арктике и Антарктике. Отсюда понятна важность изучения циркуляции Южного океана и ее влияния на изменения погодных и климатических условий в глобальном масштабе.

Постановка специальных исследований в Южном океане была вызвана, прежде всего, необходимостью решения фундаментальных проблем циркуляции океана и

атмосферы с целью разработки методов долгосрочного прогноза погоды и колебаний климата, изучения экологических систем в океане и его биологической продуктивности для создания научных основ промысла и воспроизводства биологических ресурсов. Для решения этих проблем на тот момент было явно недостаточно знаний о характере крупномасштабных процессов в области Южного океана. Существовали достаточно противоречивые представления о пространственной структуре АЦТ, не были ясны закономерности крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой, отсутствовали достаточно надежные прямые и косвенные измерения потоков тепла и влаги из океана в атмосферу и т.д. В частности, предполагалось существование мощного противотечения под АЦТ (Трещников, Баранов, Корнилов, 1974).

Начало реализации программы было положено 15-м рейсом НИС «Профессор Зубов», который открыл качественно новый этап в исследованиях Южного океана. Это был первый шаг в осуществлении одного из основных натуральных экспериментов программы «ПОЛЭКС-Юг», названного «Динамика Антарктического циркумполярного течения как звена общей циркуляции Мирового океана». Осуществление этого эксперимента началось с пролива Дрейка (Трещников, Саруханян, Смирнов, 1975), который является одним из наиболее интересных районов с точки зрения динамики АЦТ. Исследования пролива Дрейка начались в 1974—1975 гг. советскими и американскими учеными в рамках национальных программ.

Одной из основных задач первого натурального эксперимента по программе «ПОЛЭКС-Юг» было исследование структуры АЦТ, что было обусловлено сложившимся к тому времени различием взглядов на структуру АЦТ по вертикали (Трещников, Баранов, Корнилов, 1974). Для решения этой задачи было предусмотрена установка АБС (автономных буйковых станций) с измерителями течений. Были поставлены две станции, общая продолжительность их работы составила 50 суток. Измерители были расположены на глубинах 50, 500, 1000, 2000, 3000, 3500 м. Была выполнена океанологическая съемка района размером 190×240 миль, содержащая 72 гидрологические станции. Проводились ежедневное четырехразовое аэрологическое зондирование до высоты 30 км, регулярные метеонаблюдения, обработка и анализ спутниковой информации о состоянии облачности и ледяного покрова.

В результате анализа полученных данных были описаны пространственная структура АЦТ на акватории пролива и характер внутримесячной изменчивости течений. Одним из основных результатов стало обнаружение в проливе Дрейка под основным потоком АЦТ глубинного противотечения, подтвердившее выводы, сделанные в указанной выше работе. Было установлено, что придонные воды, начиная с глубины 2000—2500 м, занимают всю площадь пролива, перемещаясь с востока и юго-востока. Однако был поставлен под сомнение вывод работы об эквивалентности расходов АЦТ и его противотечения (Трещников, Саруханян, Меньшов, 1976). Стало очевидной необходимость дальнейших экспериментов.

Продолжить реализацию этого эксперимента было решено в рамках совместной российско-американской программы в соответствии с Протоколом совместной советско-американской Объединенной комиссии по сотрудничеству в области исследования Мирового океана. На прошедшей в мае 1975 г. в Москве Второй сессии Объединенной комиссии была достигнута договоренность о дальнейшем развертывании натуральных экспериментов на базе международного сотрудничества для углубленного изучения выявленных в первых экспериментах особенностей пространственно-временной

изменчивости атмосферных и океанических процессов при их взаимодействии в Южном океане. Конкретная программа совместных советско-американских экспедиционных исследований в проливе Дрейка в январе — феврале 1976 г. была обсуждена на Международном совещании по изучению Южного океана (США, г.Корваллис, сентябрь 1975 г.). Международная программа совместных советско-американских экспедиционных исследований получила название International Southern Ocean Studies (ISOS). Программа «ПОЛЭКС-Юг» был фактически нашим вкладом в ISOS.

Эти совместные исследования в проливе Дрейка стали отправным пунктом в большой международной программе натуральных исследований крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Южной полярной области. Советские предложения к этой программе предусматривали проведение комплексной международной экспедиции силами 10—15 судов на акватории Южного океана, постановку заякоренных измерителей течений и температуры воды на разрезе в проливе Дрейка, а также на разрезах Южная Африка — Антарктида, Австралия — Антарктида и проведение океанографических работ в морях Дейвиса и Уэдделла.

Задачи для работ в проливе Дрейка были сформулированы следующим образом (Смирнов, 1978):

- 1) изучение энергообмена между атмосферой и океаном в районе пролива Дрейка;
- 2) исследование связи динамики АЦТ с изменениями энергетических характеристик атмосферы;
- 3) изучение пространственно-временной структуры АЦТ и выявление основных причин, управляющих его динамикой;
- 4) изучение взаимосвязи динамики АЦТ с полярной фронтальной зоной (ПФЗ).
- 5) количественная оценка водо- и теплообмена в исследуемом районе и их колебаний во времени;
- 6) изучение взаимодействия АЦТ с динамикой водных масс в районах, прилегающих к проливу Дрейка.

Работы в проливе Дрейка в рамках экспедиции «Полэкс-Юг-76» выполнялись советскими учеными на НИС «Профессор Визе» и американскими учеными на судне «Томас Томпсон».

За экспедицию было выполнено 80 гидрологических станций, из которых 59 в виде шести разрезов в проливе Дрейка. Выполнялся широкий комплекс метеорологических, аэрологических, ледовых наблюдений.

В результате проведенных двух экспериментов была исследована пространственно-временная структура АЦТ и антарктический полярный фронт (АПФ). В частности, было установлено наличие трех основных струй АЦТ, выявлено сильное меандрирование струй, формирование вихрей с обеих сторон от АПФ, что связано со значительными градиентами скорости течения и плотности воды, а также со сложным рельефом дна. Как было установлено, именно меандры и вихри формируют в отдельных районах потоки обратного направления, ранее принимавшиеся за противотечение. Правда, в нижнем слое на глубине 3000—3500 м действительно наблюдалось слабое течение западного направления.

Поскольку вопрос о существовании противотечения был достаточно актуален и принципиален, на основе выполненных наблюдений были высказаны следующие соображения (Трешников и др., 1978).

Наблюдаемые противотечения, скорее всего, представляют собой локальные явления, имеющие перемежающийся характер, возбуждаемые особенностями рельефа либо стоком холодных придонных вод, скапливающихся у западных границ океанов или у западных склонов меридиональных подводных хребтов.

Противотечения первого типа развиваются в виде струй западных потоков от поверхности до дна и переносят водные массы, не отличающиеся по своим свойствам от вод основного потока АЦТ. Наличие крупных меандров, связанных с подводными возвышенностями, приводит к регистрации противотечений на разрезах, секущих поток.

Противотечения второго типа развиваются как придонные течения со сравнительно малыми скоростями, которые переносят водные массы, отличающиеся по свойствам от вышележащих вод. Примером такого противотечения является противотечение в проливе Дрейка, переносящее на запад придонные воды моря Уэдделла.

По результатам первых двух экспериментов были сформулированы и планы на будущее (Трешников, Саруханян, Смирнов, 1978), которые включали в себя следующие пункты:

- 1) исследование пространственной и временной изменчивости АЦТ и АПФ с постановкой АБС в районах Африка — Антарктида, Австралия — Антарктида; необходимы полигонные исследования в районе АПФ для изучения образования и динамики крупномасштабных меандров и вихрей во фронтальной области, а также для оценки вклада синоптической изменчивости динамики вод в формирование общего расхода АЦТ;

- 2) изучение меридиональной циркуляции в Южном океане (получение количественных оценок);

- 3) исследование механизма образования АДВ;

- 4) определение потоков тепла из океана в атмосферу.

Задачами следующего натурного эксперимента — «ПОЛЭКС-Юг-77» — являлось исследование структуры и динамики водных и воздушных масс, а также пространственно-временной структуры АЦТ и гидрологических фронтальных разделов на акватории между Австралией и Антарктидой. Планы совместных советско-американских экспедиционных исследований в Южном океане летом 1977 г. были обсуждены и согласованы на советско-американском совещании по обсуждению результатов совместных работ в Южном океане в 1975—1976 гг. и разработке программы дальнейших исследований (Ленинград, июль 1976 г.) и на научной сессии ISOS (Боулдер, США, август 1976 г.). В австралийском секторе Южного океана работало НИС «Профессор Зубов». Одновременно в проливе Дрейка на судне «Мелвилл» (США) выполнялись инструментальные наблюдения за течениями и колебаниями уровня моря.

На акватории между Австралией и Антарктидой в феврале 1977 г. были проведены инструментальные наблюдения за течениями с помощью трех притапливаемых буйковых станций (ПБС). Также были выполнены 21 глубоководная гидрологическая станция с определением гидрологических и гидрохимических параметров морской воды и 186 зондирований обрывными зондами на трех разрезах вдоль 132° в.д. и в районе двух мезомасштабных съемок. Были выполнены учащенные аэрометеорологические наблюдения. Основные научные результаты изложены в работе Савченко, Меньшова (1979).

Южным летом 1977/78 г. в районе моря Скоша и пролива Дрейка был проведен эксперимент «ПОЛЭКС-Юг-78», в ходе которого была выполнена гидрологическая съемка моря Скоша, поставлены три буйковые станции с измерителями течений на

различных горизонтах в районе прохода через Южно-Антильский хребет, произведена детальная съемка полярной фронтальной зоны.

Как видно, важнейшей составляющей океанографических наблюдений в рамках программы «ПОЛЭКС-Юг» была организация прямых инструментальных наблюдений за течениями. Наряду с гидрологическими наблюдениями это создало возможность достоверного описания структуры и изменчивости Антарктического циркумполярного течения. По результатам трех экспериментов в районе пролива Дрейка и моря Скоша удалось получить достаточно достоверную картину структуры и изменчивости АЦТ в этом районе (Саруханян, Смирнов, 1981).

Совместное рассмотрение результатов инструментальных наблюдений за течениями в проливе Дрейка и в районе прохода через Южно-Антильский хребет, а также данных расчетов геострофических течений, выполненных для всего района от поверхности 2500 децибар, показало, что в общем потоке вод, входящих в пролив Дрейка, выделяются три основные струи: северная — течение мыса Горн, центральная — стрежень АЦТ, южная — течение из моря Беллинсгаузена. Центральная и южная струи наиболее устойчивы, причем наибольшие скорости течений, составляющие по осредненным данным 35—40 см/с, наблюдались в центральной струе. Северная струя наиболее динамична и, судя по годовым сериям наблюдений, представляет собой некоторый ансамбль вихрей синоптического масштаба. Течения в проливе сохраняли преобладающее северо-восточное направление вплоть до горизонта 3000 м, причем скорость течений убывала до средних значений 5—10 см/с. Ниже горизонта 3000 м в проливе Дрейка наблюдалось слабое западное течение со средней скоростью 2—5 см/с, связанное с переносом донных вод из моря Уэдделла.

Многоструйность АЦТ сохранялась и в море Скоша. Проникновение АЦТ до больших глубин — практически до дна — сохранялось на всем протяжении от пролива Дрейка до выхода из моря Скоша. Так, средний поток АЦТ, выходящий через проход в Южно-Антильском хребте, характеризуется, по инструментальным данным, устойчивым направлением на север от поверхности до дна и однородным распределением скорости по вертикали, которая составляет (по осредненным данным) от 40 см/с в поверхностных слоях до 20 см/с вблизи дна. Оценки переноса вод через пролив Дрейка и водного баланса западной и центральной частей моря Скоша с учетом результатов инструментальных наблюдений показали, что расход воды, поступающей в море Скоша через пролив Дрейка, составляет около 105—125 свердрупов ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), а через южную границу — около 20 Св. Основная часть вод, поступающих с запада, выносится через северную границу, и лишь 8—10 % этих вод уходит в восточную часть моря, в водном балансе которого преобладают воды из моря Уэдделла.

В спектрах колебаний скорости течений, по данным длительных наблюдений, основная энергия приходится на низкочастотную часть в диапазоне периодов от четырех-пяти до 60 суток. При этом колебания с периодами около пяти-шести суток связаны с баротропными возмущениями, возникающими под воздействием крупномасштабных барических образований и проникающими до больших глубин. Весьма существенный вклад в изменчивость синоптического масштаба вносят колебания с периодом около 14 суток, которые генерируются долгопериодным лунным приливом, и колебания с периодом около 30 суток, природа которых пока неясна. В области мезомасштабной изменчивости основная энергия приходится на долю приливных и инерционных колебаний, которые наиболее отчетливо выражены в проливе Дрейка.

Определение границ ПФЗ и изучение ее структуры проводилось на основании результатов подробных съемок, выполненных с расстоянием между станциями в зоне фронта 10—20 миль. Совместный анализ советских и американских данных по вертикальному распределению температуры и солёности в верхнем 1000-метровом слое океана позволил установить границы ПФЗ и их межгодовую изменчивость. Оказалось, что положение границ ПФЗ в некоторых районах изменяется до 70—80 миль, однако общая структура и среднее положение зоны остаются постоянными. Ширина зоны в рассматриваемой области, в общем, невелика (30—40 миль) и только в отдельных районах вследствие процессов меандрирования и вихреобразования ПФЗ расширяется до 150—200 миль.

Впервые были исследованы и описаны особенности структуры ПФЗ. По мере приближения к фронтальной зоне с юга слой температурного минимума антарктических вод заметно заглубляется и расширяется. В самой зоне градиенты температуры и солёности наиболее хорошо выражены в слое 50—150 м, т.е. ниже поверхностного перемешанного слоя. Характерной особенностью фронтальной зоны является также изменение знака градиента солёности, начиная с горизонта 200 м. Судя по распределению температуры и солёности, в зоне фронта происходит смешение и опускание антарктических и субантарктических вод до глубины 500 м и более, что свидетельствует об образовании новой водной массы — антарктических промежуточных вод.

Процессы вихреобразования и меандрирования значительно усложняют описанную структуру ПФЗ. Градиенты температуры и солёности с глубиной неоднократно меняют знак.

Применение компонентного анализа позволило установить границы распространения водных масс в восточной части моря Беллинсгаузена, проливе Дрейка и море Скоша. Были выделены основные характерные водные массы Южного океана: поверхностная субантарктическая, поверхностная антарктическая (с зимней подповерхностной модификацией), циркумполярная глубинная и донная антарктическая. Обнаружены признаки существования антарктических промежуточных вод. Анализ средних характеристик водных масс показал изменение их свойств при движении с запада на восток, что связано с заметным влиянием антарктических вод моря Уэдделла на гидрологический режим моря Скоша, особенно в его восточной части.

Таким образом, в результате проведения натурных исследований в рамках советско-американского сотрудничества в проливе Дрейка и море Скоша удалось установить ряд принципиально новых особенностей пространственной структуры циркуляции вод в указанном районе, временной изменчивости течений, структуры и динамики полярной фронтальной зоны, распределения водных масс и процессов взаимодействия между атмосферой и океаном. Заметим, что большинство сделанных выводов актуальны и на сегодняшний день.

Вместе с тем, анализ полученных данных стал базой для планирования последующих натурных экспериментов. Развитие исследований по программе «ПОЛЭКС-Юг» предусматривало осуществление крупномасштабных натурных экспериментов с привлечением большого числа судов и в других регионах Южного океана.

Наиболее крупный натурный эксперимент был проведен в январе — марте 1979 г., когда силами двух судов — «Профессор Визе» и «Профессор Зубов» — была выполнена крупномасштабная съемка на акватории между Африкой и Антарктидой. Наблюдениями был охвачен район океана, ограниченный меридианами 10 и 30° в.д., и параллелями

35 — 57° ю.ш. Станции съемки располагались через 1° по широте и 2,5° по долготе. На меридиане 20° в.д. были поставлены четыре буйковые станции с горизонтами размещения самописцев течений 150, 500, 1000, 2000, 3000 м. Нижний горизонт находился в 200 м от дна. Продолжительность наблюдений составила 52—55 суток.

В 1982—1983 гг. была проведена экспедиция в районе Аргентинской котловины и Фолклендского плато. НИС «Профессор Зубов» выполнил четыре разреза (по меридианам 38, 43, 48 и 53° з.д.), на которых было выполнено 64 глубоководных гидрологических станций. В зоне АЦТ на меридиане 38° з.д. были выставлены четыре буйковые станции с самописцами течений на горизонтах 150, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 м.

В январе — марте 1981 г. в рамках программы «ПОЛЭКС-Юг-81» был проведен первый межведомственный натурный эксперимент. Океанографическая съемка в секторе 140—175° в.д. была выполнена силами шести судов и состояла из 190 глубоководных гидрологических станций. В эксперименте принимали участие суда ААНИИ «Профессор Визе» и «Профессор Зубов», суда Дальневосточного научно-исследовательского института «Прилив» и «Волна», суда Тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии «Мыс Юноны» и «Мыс Тихий».

В районе ПФЗ проводилось учащенное зондирование верхнего 1000-метрового слоя. Вдоль меридиана 152°30' на широте 50°30', 53°30', 56°30', 58°30' и 61°30' ю.ш. были поставлены буйковые станции с измерителями течений на горизонтах 150, 500, 1000, 2000 м и у дна. В результате было получено 22 ряда данных инструментальных наблюдений за течениями продолжительностью от 15 до 45 суток. Данные наблюдений стали основой для изучения циркуляции водных масс, фронтов и энергетики океана и атмосферы в данном регионе (Романцов, 1986).

Крупная съемка малоизученной области Южного океана — западной части тихоокеанского сектора — была выполнена НИС «Профессор Визе» и НИС «Профессор Зубов» в декабре 1985 г. — феврале 1986 г. Съемка состояла из девяти меридиональных разрезов, располагавшихся в секторе 167°30' в.д. — 132°30' з.д. Всего съемка содержала 214 глубоководных гидрологических станций.

Таким образом, 1986 г. можно считать завершающим в выполнении программы «ПОЛЭКС-Юг», поскольку это был последний крупномасштабный эксперимент по изучению основного звена циркуляционной системы Южного океана — Антарктического циркумполярного течения. Схема полигонов натурных экспериментов, выполненных в рамках программы «ПОЛЭКС-Юг», показана на рис. 1.

На рисунке показана донная топография и положение АЦТ, границы которого определены путем расчетов динамическим методом по современной базе данных океанографических наблюдений. Выделены границы полигонов отдельных натурных экспериментов.

В результате натурных исследований, проведенных в период реализации программы «ПОЛЭКС-Юг», удалось многое узнать и уточнить в понимании физических процессов и динамики вод Южного океана. Важным достижением стало экспериментальное подтверждение того факта, что АЦТ как однонаправленное течение распространяется до дна, и, хотя скорость течения, как правило, уменьшается с глубиной, в отдельных районах и у дна наблюдаются потоки со скоростью 70—80 см/с.

В целом, АЦТ представляет собой мощный зональный поток вод шириной 1500—2400 км, в котором выделяются отдельные струи с повышенными скоростями (до 50—100 см/с). Установлено, что струи АЦТ характеризуются сильным меандрированием, связанным с эффектами бароклинности и влиянием донной топографии.

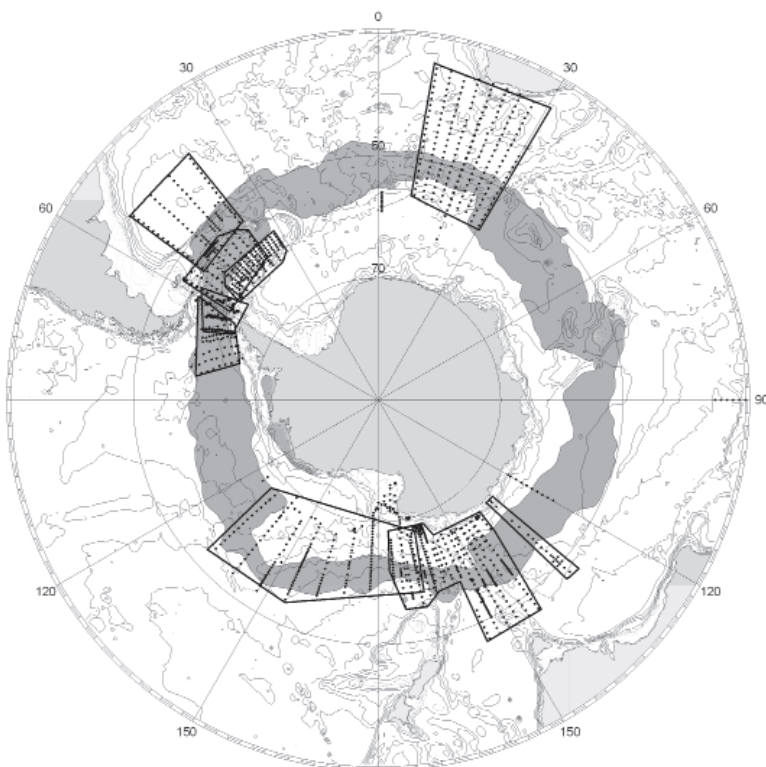


Рис. 1. Положение полигонов экспедиций, проведенных в рамках проекта «ПОЛЭКС-Юг».

Были получены оценки переноса вод в системе АЦТ и водообмена с прилегающими океанами. По данным инструментальных наблюдений исследован спектр временной изменчивости течений, начиная с мезомасштабной и заканчивая сезонной.

Исследована структура полярной фронтальной зоны и антарктического полярного фронта (АПФ). Установлено положение ПФЗ и ее временная изменчивость, связанная в основном с меандрированием АЦТ. Выявлены основные признаки АПФ как южной границы ПФЗ: резкое разграничение между холодными антарктическими и более теплыми субантарктическими водами, утолщение холодного поверхностного слоя антарктических вод перед АПФ, создающее значительные градиенты плотности в этой зоне. Полигонные наблюдения позволили подтвердить и описать возникновение вихревых структур типа «рингов» в области ПФЗ, образующихся в результате меандрирования потока, а также определить их параметры.

Важным результатом явилось определение характеристик, границ, особенностей распространения и трансформации водных масс, переносимых АЦТ. В частности, была установлена кардинальная роль прибрежных районов Антарктики в формировании и трансформации всех типов водных масс Южного океана. В том числе и с этим фактом связано то, что сначала параллельно с исследованием АЦТ, а позже и в основном экспедиционные исследования ученых как ААНИИ, так других ведущих научных центров всего мира, проводившиеся по национальным и международным программам, были перенесены к югу от АЦТ.

К началу 1980-х годов уже имелось достаточно подробное представление о режиме океана и атмосферы этой части Южного океана. Эта область площадью 35×10^6 км², называемая также антарктической зоной Южного океана, играет важную роль в глобальной климатической системе планеты. В антарктической зоне формируются наиболее холодные и плотные донные и глубинные воды Мирового океана, оказывающие существенное влияние на глобальную структуру и интенсивность меридиональной циркуляции вод Мирового океана. Занимающая самый нижний слой океана антарктическая донная вода (АДВ) растекается по дну на север вплоть до умеренных широт Северного полушария. Скорость образования АДВ определяет изменчивость меридиональной циркуляции Мирового океана на временных масштабах 100—1000 лет (Антипов, Данилов, Клепиков, 1998).

Крупномасштабная динамика вод антарктической зоны Южного океана характеризуется системой замкнутых циклонических циркуляций, наиболее крупными из которых являются круговороты Уэдделла и Росса. Круговорот Уэдделла расположен южнее АПФ и вытянут от Антарктического полуострова приблизительно до меридиана 30° в.д. Он ограничен с юга и запада Антарктидой, а его северная и восточная границы открыты для обмена с соседними районами Южного океана.

Горизонтальная циркуляция водных и воздушных масс и вертикальные потоки тепла в гидросфере и атмосфере в антарктической зоне оказывают влияние не только на глубинные слои океана и эволюцию ледяного покрова, но и на функционирование экосистем и устойчивость ледяного щита Антарктического материка. Все это тесно связано с формированием пресноводного баланса, баланса углекислого газа, колебаниями уровня океана и изменениями климата не только Южного полушария, но и всей планеты.

Начало интенсивным международным исследованиям антарктической зоны было положено в начале 1980-х годов, когда был проведен советско-американский натуральный эксперимент «Уэдделл-ПОЛЭКС-81».

Главной предпосылкой для его организации послужили результаты анализа спутниковых данных о распределении льдов в Атлантическом массиве. Согласно этим данным, в 1974—1976 гг. в зимний период в районе поднятия Мод существовала окруженная сплоченными дрейфующими льдами обширная зона чистой воды площадью более 100 тыс. км², получившая название полыньи Уэдделла. С учетом уникальности этого гидрофизического объекта и в соответствии с межправительственным соглашением о сотрудничестве СССР и США в области исследований Мирового океана в указанный район в октябре 1981 г. была направлена советско-американская экспедиция на НЭС «Михаил Сомов». Основными задачами экспедиции являлись: исследование океанических процессов в условиях полыньи Уэдделла для выявления основных механизмов, ответственных за формирование и существование полыньи; исследование процессов взаимодействия атмосферы и океана в районе поднятия Мод как во льдах различной сплоченности, так и при свободной от льда поверхности. Плавание и экспедиционные работы осуществлялись в сложных ледовых условиях; продолжительность ежедневных вынужденных остановок судна вследствие сильных приливных сжатий достигала порой 10—12 часов.

В период экспедиции был выполнен обширный комплекс океанографических, метеорологических, ледовых и гидробиологических наблюдений. Океанографические станции (в том числе трехсуточные), гидробиологические станции, регулярные

аэрологические зондирования и метеонаблюдения, градиентные наблюдения в приводном слое атмосферы проводились с борта судна. Во время выполнения станций и вынужденных стоянок проводились высадки на лед для ледоисследовательских работ и градиентных наблюдений.

Хотя спутниковые данные показали отсутствие полыньи в 1981 г., а собственно района, где она наблюдалась, достичь не удалось, собранные в период этого натурального эксперимента данные носят уникальный характер. Впервые достаточно подробно была описана стратификация Южного океана под льдом, продемонстрирована возможность существования больших потоков тепла через слабый пикноклин в зимнее время, обнаружены и исследованы теплые вихревые образования синоптического масштаба, исследованы физические, химические и биологические свойства льда и т.д. В результате эксперимента была сформулирована физически обоснованная схема формирования полыньи Уэдделла, впервые описаны состояние и особенности структуры океана, ледяного покрова и приземного слоя атмосферы данного района в зимний период, установлена важная климатообразующая роль района полыньи Уэдделла и круговорота в целом, сформулированы цели и задачи дальнейших исследований круговорота Уэдделла как самостоятельной гидрофизической системы (Багрянцев, Саруханян, 1986).

В соответствии с этими целями и задачами в последующие годы в круговороте Уэдделла было осуществлено еще несколько экспедиций. Его северная и восточная границы, а также район поднятия Мод исследовались в экспедиции на НИС «Профессор Визе» летом 1984 и 1988 гг., на НИС «Профессор Зубов» летом 1988 г. (Антипов и др., 1990; Гурецкий, Данилов, 1990). В том же 1988 г. первые океанографические станции в Южном океане были сделаны с борта нового флагмана флота ААНИИ — НЭС «Академик Федоров». Ледовые качества этого судна открыли широкие возможности для исследования антарктической зоны, которые и были эффективно использованы.

Практически в то же время была сформулирована долгосрочная программа «Международные исследования антарктической зоны Южного океана» (International Program of Investigation of the Antarctic Zone of the Southern Ocean, IAnZone), главная задача которой состояла в исследовании условий формирования антарктического морского ледяного покрова. Первым шагом в реализации этой программы стала международная зимняя экспедиция в район круговорота Уэдделла в 1989 г. Она была организована ААНИИ совместно с Институтом полярных и морских исследований Альфреда Вегенера (ФРГ) на научно-исследовательских судах «Академик Федоров» и «Поларштерн».

Основными задачами экспедиции были: определение крупномасштабной термохалинной структуры круговорота Уэдделла; определение роли циркумполярной глубинной воды в формировании зимней стратификации верхнего слоя океана при наличии ледяного покрова; изучение мезомасштабной структуры области теплых вод к западу от поднятия Мод в период максимального развития ледяного покрова; оценка вертикальных потоков импульса, тепла и соли в системе океан — лед — атмосфера.

Экспедиция проводила работы в круговороте Уэдделла в сентябре — ноябре 1989 г. в период максимального развития ледяного покрова. За время работ было выполнено 127 судовых и 18 вертолетных гидрологических станций на нескольких пересекающих круговорот разрезах и на полигоне к западу от поднятия Мод.

Выполнение научной программы экспедиции позволило получить наиболее полный к тому моменту массив данных по различным дисциплинам, описывающий зимние условия в Южном океане в период максимального развития ледяного покрова.

В частности, подтверждена тесная связь между состоянием слоя глубинной воды и характеристиками ледяного покрова (в среднем при более теплом слое глубинной воды лед тоньше), доказана особая роль поднятия Мод в создании характерной динамики района, экспериментально подтвержден механизм образования польньи Уэдделла, обнаружен ряд новых аспектов биологической активности антарктических вод в зимних условиях (Антипов и др., 1994).

К концу 1980-х годов в круговороте Уэдделла оставалась неисследованной (из-за сложных ледовых условий) крайняя западная, прилегающая к Антарктическому полуострову акватория. Вместе с тем, сформировавшиеся к этому времени представления о структуре и циркуляции вод круговорота Уэдделла и роли гидрофизических процессов в этом регионе в общей климатической системе сделали проведение экспедиционных исследований в этом регионе весьма актуальным.

Для проведения экспедиционных работ в этом районе была подготовлена и осуществлена совместная российско-американская экспедиция «Дрейфующая станция «Уэдделл-1»». Ключевым моментом в этом комплексном натурном эксперименте была организация дрейфующей станции, поскольку в мировой практике использование морского антарктического льда для этих целей не имело прецедента.

Задачей экспедиции было получение данных о состоянии системы глубокий океан — верхний слой океана — дрейфующий лед — пограничный слой атмосферы для района, где формируются наиболее холодные модификации водных масс Мирового океана. Эти данные необходимы для определения количественных параметров вертикального обмена в указанной системе и связи их с горизонтальными переносами, что в конечном итоге даст возможность оценить влияние процессов на шельфе и склоне Антарктического полуострова на планетарные климатические процессы.

Ключевую роль в реализации планов экспедиции сыграло НЭС «Академик Федоров», осуществившее организацию дрейфующей станции и совместно с американским судном «Натаниель Палмер» обеспечившее ее эвакуацию.

В результате проведенной ледовой разведки была выбрана льдина для дрейфующей станции «Уэдделл-1» в точке с координатами 71°36,8' ю.ш., 49°45,4' з.д. В режиме автономного дрейфа станция «Уэдделл-1» проработала с 12 февраля по 4 июня 1992 г. и закончила работу в точке 65°38' ю.ш., 52°25' з.д.

За период с февраля по июнь 1992 г. было выполнено более 250 гидрологических станций. Наблюдения велись с дрейфующего ледяного поля, с вертолета на зональных разрезах, пересекающих шельф и материковый склон, и с борта научно-исследовательских судов «Академик Федоров» и «Натаниель Палмер». Одновременно был выполнен большой комплекс исследований ледяного покрова и приледного слоя атмосферы. За период с 11 февраля по 9 июня дрейфующая станция «Уэдделл-1» прошла вдоль меридиана с юга на север около 400 миль со средней скоростью около 3 миль в сутки.

В результате была получена уникальная информация о крупномасштабной структуре и циркуляции вод западного звена круговорота Уэдделла, пространственных и временных особенностях изменчивости тонкой структуры подледного слоя океана, особенностях процессов взаимодействия в системе океан — лед — атмосфера, особенностях строения и структуры морского льда, деформационных процессах в ледяном покрове и т. д. Значение этих работ огромно хотя бы уже потому, что они велись по специально разработанным программам, направленным на решение проблем не только гидрологии Южного океана, но и гидрологии Мирового океана в целом.

Впервые были определены особенности циркуляции и структуры водных масс западной части круговорота Уэдделла. Установлено, что направленное на север течение на западе моря Уэдделла является звеном единой циркуляционной системы — круговорота Уэдделла. Оно является существенно баротропным западно-интенсифицированным течением, ширина которого оценивается в 400 км. Внешняя составляющая этого потока приурочена к области материкового склона и находится под сильным влиянием топографии, среднесуточные скорости в приповерхностном слое превышают 10 см/с, а ее расход возрастает в северном направлении от 12 до 28 Св. Этот компонент течения очень важен, так как поставляет тепло и соль с восточной периферии круговорота Уэдделла. Внутренний компонент западного пограничного течения переносит рециркулирующие внутри круговорота водные массы. При этом средняя за период дрейфа скорость в приповерхностном слое составила 1 см/с. Оценка общего расхода западного пограничного течения составляет 40 Св (Антипов, Данилов, Клепиков, 1998).

Наряду с круговоротом Уэдделла в рамках программы «ПОЛЭКС-Юг» проводилось и изучение круговорота Росса. Его исследования были начаты в 1986 г. на НИС «Профессор Визе» и НИС «Профессор Зубов» (данные этой экспедиции описаны выше). Работы проводились на меридиональных разрезах в секторе 170° в.д. — 130° з.д. Исследованиями не была охвачена южная часть круговорота, покрытая дрейфующими льдами. В 1988 г. с учетом выполненных в предыдущей экспедиции работ была обследована юго-западная часть круговорота Росса на судах «Профессор Зубов» и «Академик Федоров».

В результате анализа полученных данных установлена крупномасштабная структура круговорота. По данным синоптической съемки определен расход восточного звена круговорота Росса, оценка которого на широте 67° ю.ш. в слое 0—1000 м составила 1,5 Св.

Данные подтвердили формирование донных вод в области бровки шельфа в центральной части открытой границы моря Росса. Были определены положение и характеристики потока высокосоленых донных вод в области материкового склона западнее моря Росса.

Показана роль области шельфа на западной периферии круговорота как мощного источника охлаждения глубинных вод круговорота Росса. Установлено участие в процессах охлаждения глубинных и поверхностных вод этого района переохлажденной воды шельфовых ледников. Определено влияние локального апвеллинга в области фронта антарктического склона на структуру и характеристики поверхностных и подповерхностных вод (Антипов, Клепиков, 2007).

Экспедиционные исследования окраинных морей Антарктики проводились за эти годы только в районах морей Космонавтов и Дейвиса. В проведении экспедиционных исследований по программам, разработанным в ААНИИ, принимали участие и суда других ведомств, в частности суда гидрографической службы ВМФ. Крупномасштабные съемки в этих районах проводились в 1978 г. с борта НЭС «Михаил Сомов» и в 1990 г. с борта НИС «Профессор Зубов».

С 1993 по 1996 г. в экспедиционных исследованиях Южного океана судами флота ААНИИ (а в этот период уже только НЭС «Академик Федоров» мог выполнять такие исследования) был перерыв. Возобновлены работы были в 1997 г., а с 1999 по 2013 г. проводились по подпрограмме «Изучение и исследование Антарктики» Федераль-

ной целевой программы «Мировой океан». На первых двух этапах (1999—2007 гг.) океанографические работы проводились по проекту НИОКР «Определить климатообразующую роль Южного океана» раздела «Современный климат» данной подпрограммы. На третьем этапе подпрограммы (2008—2013 гг.) исследования велись по ключевому мероприятию 1 «Определение изменений в окружающей среде Антарктики в условиях меняющегося климата». Финансовая поддержка со стороны подпрограммы позволила сохранить сложившийся годами коллектив специалистов, способствовала привлечению ученых из других институтов, в частности Гидрометцентра России и Всероссийского НИИ рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО).

Основным районом океанографических исследований стал залив Прюде, что связано как с его расположением на маршруте переходов судна для обеспечения антарктических станций, так и с объективно существующим интересом к режиму этого района. Предполагалась важная роль этого района в процессах вентиляции глубинных и формировании антарктических донных вод. Программы океанографических наблюдений, разработанные специалистами ААНИИ, были направлены на исследование этой проблемы. В соответствии с этими программами выполнены океанографические станции как на юго-западе залива, вблизи фронта шельфового ледника Эймери, так и на открытой границе залива, через шельф и материковый склон.

В результате проведенных исследований были установлены характеристики и ареал распространения переохлажденных (вследствие взаимодействия с нижней поверхностью шельфового ледника Эймери) шельфовых вод. Разрезы, впервые выполненные через материковый склон в этом районе с высоким пространственным разрешением (расстояние между станциями 3—4 мили), позволили получить уникальную информацию о структуре вод в области антарктического склонового фронта, установить параметры фронта, определить характеристики водных масс. Была исследована структура антарктического склонового фронта на различных участках материкового склона, получены данные о сезонной изменчивости его параметров. Впервые получено подтверждение данными наблюдений факта формирования в этом регионе антарктических донных вод, определены их характеристики, локализован район формирования.

Новым важным этапом исследований Южного океана стал Международный полярный год 2007/08. Сегодня очевидно, что Южный океан играет одну из ключевых ролей в глобальном тепловом и пресноводном балансе. Трансформация водных масс в Южном океане связывает глубинные и поверхностные ветви глобальной термохалинной циркуляции. Перенос теплых и соленых ЦГВ в восточных звеньях субполярных циклонических круговоротов к побережью Антарктиды создает условия для развития конвективных процессов в антарктической зоне Южного океана (Антипов, Клепиков, 2003). Это приводит к образованию аномалий в морском ледяном покрове (попыней) из-за «подогрева» снизу, вызывает таяние оснований шельфовых ледников, способствует образованию донных вод путем смешения глубинных вод с водой шельфовых ледников.

Занимающая самый нижний слой океана антарктическая донная вода выносятся на север в западных звеньях циклонических круговоротов и растекается по дну вплоть до умеренных широт Северного полушария, оказывая существенное влияние на глобальную структуру и интенсивность меридиональной циркуляции вод Мирового океана. Наконец, в Южном океане происходят самые большие сезонные изменения

площади морского льда, которая является важным климатическим параметром. Южный океан, выполняя роль ключевого связующего звена, соединяет климатические сигналы от остальной части Мирового океана и добавляет климатический сигнал Антарктики (Клепиков и др., 2011).

Понимание океанографических процессов в Южном океане и их взаимосвязей с остальной частью климатической системы является одним из оснований для прогнозирования будущих изменений. Это требует осуществления мониторинга за океанографическими параметрами Южного океана. В качестве основы такой системы мониторинга в период МПП 2007/08 были запланированы и реализованы проекты «Взаимодействие вод антарктического склона и шельфа в синоптическом масштабе» (Synoptic Antarctic Shelf Slope Interaction Study, SASSI) и «Климат Антарктики и Южного океана» (Climate of the Antarctic and Southern Ocean, CASO).

Главные задачи проекта CASO — получить «моментальный снимок» процессов в Южном океане, оценить роль Южного океана в формировании прошлого, настоящего и будущего климата, включая взаимосвязи между зональной и меридиональной циркуляцией, трансформации водных масс, взаимодействие между океаном и криосферой и, наконец, получить обоснование концепции создания экономически эффективной системы наблюдений для Южной полярной области (Клепиков и др., 2011).

Проект SASSI нацелен на исследование районов шельфа и склона вокруг Антарктики, являющихся основными районами формирования донных вод. В рамках этого проекта, в котором участвовало 13 стран, производились измерения температуры, солености и скорости течений на континентальном шельфе и склоне Антарктики на коротких разрезах с высоким пространственным разрешением поперек шельфа и склона. Понимание и количественное описание процессов в этой узкой области важны для разработки более совершенных глобальных климатических моделей (Клепиков и др., 2011).

По проектам CASO и SASSI за полевой период 2007—2009 гг. ААНИИ провел четыре экспедиции в каждом из четырех сезонов, учитывая работы в январе 2010 г., формально выходящие за рамки МПП. По проекту SASSI работы были проведены также и в январе 2011 г. в рамках так называемого наследия МПП. Работы по этим проектам стали продолжением исследований, проводившихся учеными ААНИИ в рамках национальных и международных программ в годы, предшествующие МПП (Антипов, Данилов, Клепиков, 1998; Антипов, Клепиков, 2003; Антипов, Клепиков, 2007).

Океанографические исследования ААНИИ в Южном океане по проектам МПП начались в январе 2007 г. в рамках 52-й РАЭ и завершились в 2010 г. в период работ 55-й РАЭ. Исследования проводились с борта научно-экспедиционного судна «Академик Федоров».

В соответствии с задачами проекта SASSI с борта НЭС «Академик Федоров» были выполнены разрезы через шельф и материковый склон в морях Содружества, Рисер-Ларсена, Амундсена и Беллинсгаузена. Всего с учетом работ в 2010 и 2011 гг. выполнена 91 станция, на 46 из них проводился отбор проб для определения содержания растворенного кислорода, кремния, фосфатов, нитратов, нитритов и аммиака. В январе 2007 г. выполнены три меридиональных океанографических разреза в восточной части моря Содружества, включая залив Прюдс (вдоль меридианов 62, 64 и 70° в.д., всего 29 зондирований от поверхности до дна океана), в феврале 2007 г. — разрез в море Рисер-Ларсена вдоль меридианов 15° в.д., 13 зондирований), в феврале

2008 г. — разрез в море Амундсена (15 зондирований), в феврале 2010 г. — разрез в море Беллингаузена (16 зондирований), в январе 2011 г. — повторное выполнение разреза по 70° в.д. в восточной части моря Содружества (18 зондирований). Все перечисленные разрезы отличаются высоким пространственным разрешением, особенно в области материкового склона. Расстояние между станциями на склоне уменьшалось до 2 км, что дало возможность получить подробную картину структуры вод этого района.

Результаты работ ААНИИ по проекту SASSI представлены в работах Антипова, Клепикова (2007), Антипова и др. (2009), Антипова, Клепикова (2011а), Казко, Антипова, Клепикова (2012), Головина, Антипова, Клепикова (2013). Проведенные исследования показали принципиальные различия в структуре и характеристиках вод шельфа и материкового склона между восточной (моря Рисер-Ларсена и Содружества) и западной (моря Амундсена и Беллингаузена) Антарктидой. Для морей восточной Антарктиды характерно присутствие антарктической шельфовой воды, формирующейся за счет конвективных процессов при ледообразовании и играющей важную роль в процессах вентиляции глубинных и формировании антарктических донных вод в районе антарктического склонового фронта, приуроченного к верхней части материкового склона. Эти процессы ярко выражены в области материкового склона моря Содружества, где обнаружены признаки формирования донных вод западнее 72° в.д. и отсутствие таких признаков восточнее указанной долготы.

Установлено, что донные воды являются результатом смешения циркумполярной глубинной воды с холодными шельфовыми водами, образующимися вблизи шельфового ледника Эймери. Донная вода залива Прюдс далее движется вдоль по склону на запад и вниз по каньонам и депрессиям. Температура обнаруженных донных вод составляет от $-0,3$ до $-1,6$ °С, соленость — от 34,54 до 34,62 ‰. Интенсивность опускания образующихся донных вод вниз по склону возрастает в западном направлении по мере сужения шельфа и увеличения уклона его дна (Клепиков и др., 2011).

Детальный анализ гидрофизических полей выявил закономерности и особенности шельфового и склонового каскадинга антарктической шельфовой воды, который происходит в основном в виде конвективных плюмов. Оценочная величина вклада склонового каскадинга антарктической шельфовой воды в вентиляцию глубинных и донных вод Южного океана составляет примерно 0,04—0,24 Св на бровке шельфа протяженностью около 70 км и соответствует подобным оценкам для других районов Антарктики (Головин, Антипов, Клепиков, 2011; Головин, Антипов, Клепиков, 2013).

В районе моря Рисер-Ларсена объемы и характеристики шельфовых вод таковы, что процессы, связанные с опусканием холодных плотных вод по материковому склону, не наблюдаются. В морях Амундсена и Беллингаузена не обнаружено признаков формирования шельфовых вод. Здесь всю толщу вод на шельфе ниже слоя поверхностных вод занимает слабо модифицированная, относительно теплая и соленая ЦГВ, которая может быть причиной активного таяния выводных и шельфовых ледников. Так, в море Амундсена распространение талых вод от ледников существенно влияет на структуру и циркуляцию вод и на разрезе проявляется, в частности, в существовании пространственно однородного поверхностного слоя толщиной около 20 м с температурой от $-1,4$ до $-1,7$ °С и аномально низкой соленостью, не превосходящей 32,8 ‰.

Значительный объем наблюдений в этот период был выполнен с помощью обрывных батитермографов ХВТ. Для исследования термической структуры и фронтов Антарктического циркумполярного течения в районе между Африкой и Антарктидой

и в соответствии с задачами проекта в период с 2007 по 2010 г. ежегодно выполнялся разрез ХВТ в диапазоне широт 68° — 35° ю.ш. по траектории разреза SR2 программы CLIVAR. В феврале 2007 г. на разрезе было выполнено 108 зондирований, в феврале 2008 г. — 111 зондирований, в феврале 2009 г. — 111 зондирований и в феврале 2010 г. — 80 зондирований.

Достаточно плотное расположение точек зондирования на разрезе позволило определить положение и характеристики основных фронтов, а также проследить некоторые особенности их межгодовой изменчивости как на поверхности, так и на более глубоких горизонтах. Установлено, что за период 2004—2010 гг. субтропический фронт сместился на юг почти на 2° широты, а антарктический полярный фронт — на север на 1° широты. Субантарктический фронт и южный фронт смещались и на юг, и на север относительно своего среднего за этот период положения, которое располагалось севернее климатического для обоих фронтов (Антипов, Клепиков, 2011б).

Проведение МПГ 2007/08 стимулировало выполнение широкого комплекса междисциплинарных исследований ключевых компонентов климатической системы Антарктики, включая Южный океан. Результаты океанографических съемок, анализ новой объемной океанографической информации, численные модели помогут получить более надежные оценки параметров изменения климата и интерпретировать роль Южного океана в формировании глобального климата.

Итоги экспедиционных исследований Южного океана судами ААНИИ за весь период с 1956 г. представлены на рис. 2.

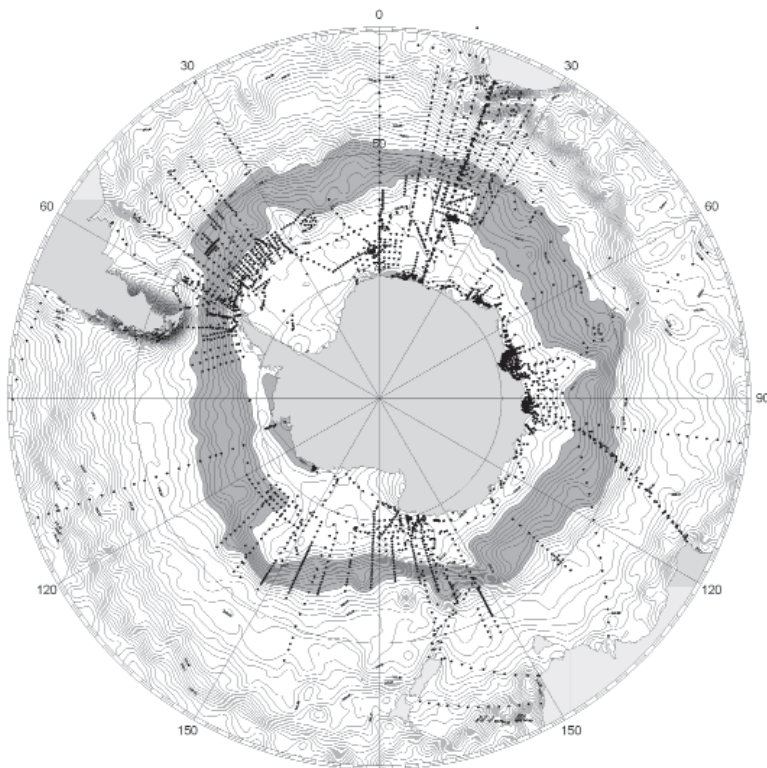


Рис. 2. Изученность Южного океана судами ААНИИ в период с 1956 по 2013 г.

На рисунке приведена наиболее достоверная на сегодняшний день схема циркуляции Южного океана, рассчитанная по данным архива ААНИИ. Очевидно, что исследовательские работы наших судов были направлены на изучение наиболее интересных и важных с океанографической точки зрения районов Южного океана.

Экспедиционные исследования Южного океана, мощный толчок к развитию которых дала программа «ПОЛЭКС-Юг», продолжают. Сегодня к ним активно подключается новое судно ААНИИ «Академик Трёшников» (рис. 3, см. цвет. вклейку). НЭС «Академик Трёшников» построено на ОАО «Адмиралтейские верфи» в 2012 г. Водоизмещение его составляет 16 160 т, автономность плавания по запасам топлива — 45 суток. Для проведения научно-исследовательских работ на судне имеется 11 штатных лабораторий, оборудованных современными приборами, установлено пять исследовательских лебедок.

Выход судна в первый антарктический рейс из Санкт-Петербурга состоялся 21 декабря 2012 г. Основными задачами этого экспериментального рейса НЭС «Академик Трёшников» были ходовые и ледовые испытания судна в условиях Антарктики, операции по обеспечению станции Беллинсгаузен, морские научные работы и испытание приборного научно-исследовательского комплекса судна.

Уже в первом рейсе судно внесло свой вклад в исследование вод Южного океана, выполнив разрез в редко посещаемом судами заливе Маргерит моря Беллинсгаузена. Эти работы были направлены на исследование структуры вод в области шельфа и материкового склона Антарктического полуострова вблизи шельфового ледника Георга VI. Разрез состоял из 35 станций и имел протяженность 380 км. Подповерхностный слой теплой циркумполярной глубинной воды (температура 1,2 °С, соленость 34,69 ‰) был обнаружен в непосредственной близости от края шельфового ледника. Теплая вода приводит к таянию ледника и распреснению поверхностного слоя вод, что также было зафиксировано наблюдениями.

Несомненно, появление нового судна позволит расширить исследования вод Южного океана. В первую очередь, речь идет о прибрежных районах, сложных в ледовом отношении, но крайне важных для понимания проблем изменений современного климата. Это очень важно для реализации новой международной программы «Система наблюдений Южного океана» (Southern Ocean Observing System, SOOS), поскольку в Южном океане ощущается недостаток судов такого класса как для исследований, так и для транспортных операций. Программа SOOS позволит организовать устойчивую систему наблюдений, которых так не хватает в Южном океане для мониторинга происходящих изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипов Н.Н., Гурецкий В.В., Данилов А.И., Малек В.Н. (1990). Структура вод восточной части круговорота Уэдделла летом 1988 г. / В сб.: Исследования Уэдделловского круговорота. Океанографические условия и особенности развития планктонных сообществ. — М.: ВНИРО. С. 60—75.

Антипов Н.Н., Багрянцев Н.В., Клепиков А.В., Малек В.Н., Масленников В.В., Чугуй И.В. (1994). Океанографические исследования в 53-й Российской зимней экспедиции в круговорот Уэдделла на НЭС «Академик Федоров» // Информ. бюл. САЭ. № 118. С. 24—32.

Антипов Н.Н., Батрак К.В., Духова Л.А., Кузнецов В.Л., Масленников В.В. (2009). Гидролого-гидрохимические исследования в 53-й Российской антарктической экспедиции на научно-экспедиционном судне «Академик Федоров» // Океанология. Т. 49, № 1. С. 155—158.

- Антипов Н.Н., Данилов А.И., Клепиков А.В.* (1998). Циркуляция и структура вод западной части моря Уэдделла по данным натурального эксперимента «Дрейфующая станция “Уэдделл-1”» // Антарктика. Вып. 34. С. 5—30.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2003). Циклонические круговороты окраинных морей восточной Антарктиды // Арктика и Антарктика. Вып. 2 (36). С. 126—148.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2007). Особенности океанографического режима залива Прюдс по данным экспедиций ААНИИ 1997—2007 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 76. С. 36—48.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2007). Крупномасштабная структура циркуляции вод круговорота Росса // Труды ААНИИ. Т. 447. С. 115—125.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2011а). О взаимодействии вод шельфа и глубокого океана над материковым склоном Антарктиды / В сб.: Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Том Океанография и морской лед / Под ред. И.Е.Фролова. — М. — СПб. С. 291—305.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2011б). Термическая структура верхнего слоя океана между Африкой и Антарктидой по данным океанографических работ ААНИИ 2004—2010 гг. / В сб.: Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Том Океанография и морской лед / Под ред. И.Е.Фролова. — М. — СПб. С. 280—290.
- Атлас Антарктики. Т.1. (1966). — М. — Л.: Изд-во ГУГиК. 225 с.
- Атлас Антарктики. Т.2. (1969). — Л.: Гидрометеиздат. 508 с.
- Багрянцев Н.В., Саруханян Э.И.* (1986). Особенности термохалинной стратификации вод Южного океана при наличии ледяного покрова по данным экспедиции «Уэдделл-ПОЛЭКС-81» // Информ. бюлл. САЭ. № 108. С. 18—27.
- Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2011). Общие черты и особенности стока антарктических шельфовых вод на шельфе и материковом склоне моря Содружества и их влияние на формирование донных вод Южного океана // Океанология. № 3. С. 393—408.
- Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2013). Исследование устойчивости антарктического склонового фронта в море Содружества // Метеорология и гидрология. № 11. С. 64—78.
- Гурецкий В.В., Данилов А.И.* (1990). О меридиональном обмене и взаимодействии вод круговорота Уэдделла и АЦТ // Доклады АН СССР. Т. 311, № 5. С. 1234—1238.
- Казко Г.В., Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* (2012). О глубокой конвекции на материковом склоне залива Прюдс // Проблемы Арктики и Антарктики. № 2 (92). С. 95—112.
- Романцов В.А.* (1986). Основные задачи и итоги междуведомственной комплексной экспедиции в Южный океан (Полэкс-Юг-81) / В сб.: Междуведомственная экспедиция по программе ПОЛЭКС-Юг-81 (научные результаты). — Л.: Гидрометеиздат. С. 4—13.
- Савченко В.Г., Меньшов Ю.А.* (1979). Основные научные результаты совместных советско-американских исследований в Южном океане по программе Полэкс-Юг-77 // Труды ААНИИ. Т. 360. С. 5—15.
- Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* (1981). Основные итоги советско-американских исследований по программе «Полэкс-Юг» и «Ф.Дрейк» в проливе Дрейка и море Скоша (1975—1978 гг.) // Труды ААНИИ. Т. 369. С. 4—12.
- Смирнов Н.П.* (1978). Полярный эксперимент Юг-76 // Труды ААНИИ. Т. 345. С. 4—11.
- Трёшиников А.Ф.* (1973в). Итоги и перспективы Полярного эксперимента. — Л., Репрогр. ААНИИ. 43 с.
- Трёшиников А.Ф.* (1977). Исследование полярных областей Земли // В кн.: Проблемы современной гидрометеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. С. 205—228.
- Трёшиников А.Ф., Алексеев Г.В., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* (1978). К проблеме изучения циркуляции вод Южного океана // Труды ААНИИ. Т. 34. С. 24—38.

- Трёшников А.Ф., Баранов Г.И.* (1976). Циркуляция вод Мирового океана и ее исследование в рамках глобальных экспериментов // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 47. С. 7—22.
- Трёшников А.Ф., Баранов Г.И., Корнилов Н.А.* (1974). Циркумполярное противотечение Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 43—44. С. 139—143.
- Трёшников А.Ф.* и др. (1968). Натурный эксперимент по проблеме взаимодействия океана и атмосферы // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 28. С. 5—20.
- Трёшников А.Ф.* и др. (1973а). Предварительная программа Полярного эксперимента в Южной полярной области (ПОЛЭКС-Юг). — Л., ротопр. ААНИИ.
- Трёшников А.Ф.* и др. (1973б). Проект программы Полярного эксперимента Южной полярной области. — Л., ротопр. ААНИИ. 75 с.
- Трёшников А.Ф., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* (1975). Полярный эксперимент-Юг. Исследование структуры и динамики Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка как отражения процессов взаимодействия атмосферы и океана. — Л., Репрогр. ААНИИ. 37 с.
- Трёшников А.Ф., Саруханян Э.И., Меньшов Ю.А.* (1976). Основные результаты полярного натурального эксперимента по программе ПОЛЭКС-Юг в проливе Дрейка (декабрь 1974 г. — 1975 г.) // Труды ААНИИ. Т. 344. С. 6—13.
- Трёшников А.Ф., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* (1978). Основные результаты наблюдений по программе ПОЛЭКС-Юг в проливе Дрейка в 1975 и 1976 гг. и перспективы дальнейших исследований в Южном океане // Труды ААНИИ. Т. 345. С. 12—23.