

ЭКСПЕРИМЕНТ ПОЛИГОН–70 – НАЧАЛО НОВОГО ЭТАПА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИРОВОГО ОКЕАНА (К 50-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ ОКЕАНСКИХ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ)

Неyman В.Г., Морозов Е.Г.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36,
e-mail: vneiman2007@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 19.05.2020, одобрена к печати 15.06.2020.

Пятьдесят лет тому назад, в 1970 г., в результате выполнения советской межведомственной океанографической программы Полигон–70, в северной субтропической зоне Атлантики были экспериментально обнаружены океанские синоптические вихри. Это открытие оказалось одним из наиболее значительных событий в океанологии XX века. Обладающие пространственно-временными масштабами, аналогичными атмосферным вихревым образованиям, вновь открытые вихри получили название синоптические по аналогии с циклонами и антициклонами в атмосфере. В отличие от известных ранее замкнутых циркуляционных структур, отделившихся от крупномасштабных струйных течений, синоптические вихри оказались свободными, то есть имеющими, по существу, инерционный волновой характер. Скорость течения в таких вихрях зачастую превышала среднюю скорость течения в данном районе. Описывается история проведения эксперимента Полигон–70 и его основные результаты. Приводятся краткие сведения о других крупных «полигонных» программах ИО РАН и некоторых международных проектах по изучению вихревых структур.

Ключевые слова: океан, полигон, синоптические вихри, течение, скорость, температура, буйковая станция, ринги, фронтальные вихри

Введение

Одним из наиболее значительных событий в океанологии XX века оказалось экспериментальное обнаружение океанских синоптических вихрей. Произошло это 50 лет тому назад, в 1970 г., в результате выполнения советской межведомственной океанографической программы Полигон–70 в северной субтропической зоне Атлантики. В отличие от известных ранее замкнутых циркуляционных структур, «отпочковавшихся» от крупномасштабных струйных течений и вихревых структур, возникающих под воздействием на морскую поверхность неоднородного поля ветра, вновь открытые вихри оказались энергетически свободными, то есть имеющими, по существу, инерционный волновой характер. Скорость движения воды в таких вихрях почти на порядок превышала среднюю скорость переноса воды течениями в данном районе. По аналогии с циклонами и антициклонами в атмосфере, океанские вихри, обладающие простран-

ственно-временными масштабами, подобными атмосферным вихревым образованиям, получили ставшее наиболее употребительным в русскоязычной терминологии наименование – «синоптические вихри». А вот иногда используемая добавка к этому названию, указывающая на принадлежность синоптических вихрей открытому океану, представляется не совсем удачной. Авторы этой добавки, вероятно, хотели с ее помощью подчеркнуть различное происхождение синоптических вихрей и подобного масштаба фронтальных вихревых динамических структур, в том числе рингов, возникающих в результате отделения меандров струйных течений типа Гольфстрима и Куроисио. Однако все эти виды вихревых образований формируются и существуют в условиях открытого океана. А основные различия между ними состоят в их существенно разных временных размерностях и во внутренней гидрофизической структуре. В синоптических вихрях открытого океана переносимая ими масса воды имеет те же характеристики, что и окружающая вода. В то время как вода во фронтальных вихрях и рингах отличается от окружающей, поскольку она захвачена меандром течения с его противоположной стороны (Каменкович и др., 1987).

Открытие океанских синоптических вихрей советскими учеными в 1970 г. (Brekhovskikh et al., 1971; Кошляков, 2002) стало возможным благодаря реализации одной из перспективных идей, высказанных в свое время известным отечественным океанологом-гидрофизиком В.Б. Штокманом. Как-то в начале шестидесятых годов прошлого столетия в очередной неформальной беседе со своими учениками и коллегами по лаборатории динамики течений Института океанологии АН СССР (ИО АН, ныне ИО РАН) ее заведующий – профессор Штокман – предложил обсудить вопрос о необходимости фундаментального развития методов натурных экспериментов в океане, в связи с растущими запросами реальных потребителей информации о когерентных динамических океанских структурах, среди которых для практиков, в первую очередь, интерес представляли элементы навигационной обстановки, в частности, морские течения. Речь шла о том, что существовавшие в ту пору, а именно около 60 лет тому назад, все известные способы оценки динамических характеристик гидрофизического режима океана ограничивались лишь кратковременными эпизодическими точечными измерениями скорости течений на далеко отстоящих друг от друга по пространству и времени заякоренных буйковых станциях. Результаты такого рода измерений могли давать лишь самое общее представление о параметрах ее реальной пространственно-временной изменчивости и не имели достаточной статистической обеспеченности измеряемых величин.

Придавая большое значение этой теме, известный гидрофизик и выдающийся океанолог академик А.С. Монин, будучи научным руководителем и директором ИО АН, впервые сформулировал конкретные предложения относительно совершенствования методов измерений физических характеристик водных масс океана. Вслед за профессором Штокманом им был поставлен вопрос о необходимости завершения перехода от исчерпавшего себя ориентировочного обзора случайностей к описанию актуальных закономерностей, в частности, в области гидрофизических исследований на основе более адекватных и реально теоретически обоснованных современных физических моделей изучаемых океанических процессов (Монин, Солнцева, 2007).

Полигонные исследования океанских вихревых структур советскими учеными. Полигон–67 в Индийском океане (Аравийское море)

В середине 60-х годов XX века Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР открыл фактически новую эпоху исследований гидрофизического режима Мирового океана на основе программы долговременных полигонных съемок (Штокман и др., 1969). Экспериментальные работы по этой программе начались с того, что в соответствии с предложением и теоретическим обоснованием, сформулированными профессором В.Б. Штокманом, в 1966–1967 гг. ИО АН была проведена первая специальная экспедиция с применением нетривиальной методики (научно-исследовательское судно (НИС) «Витязь», 40-й рейс) совместно с Главным Управлением навигации и океанографии МО СССР (ИС «Фаддей Беллинсгаузен»). В центральной части Аравийского моря удалось выполнить несколько разнесенных по времени повторных гидрофизических съемок значительного по площади полигона (около 200 000 кв. км), в нескольких реперных точках которого были установлены буйковые станции с самописцами течений. Результаты прямых измерений скорости течений, дополненные данными ее расчетов в геострофическом приближении, выполненные по материалам параллельных плотностных съемок, показали существование в верхнем слое океана перемежающихся во времени мезомасштабных неоднородностей в кинематической структуре движущейся океанской воды, которые впоследствии получили название синоптических вихрей открытого океана или свободных синоптических вихрей. Этим названием их терминологически отличали от вихрей фронтального происхождения типа известных рингов Гольфстрима, имеющих иную, динамическую и термохалинную, структуру (Ivanov, 1991).

Однако, как это нередко случается, авторы и участники того первого полигонного эксперимента были вынуждены сделать некоторые важные выводы из результатов своей работы, во многом исходя из своего богатого профессионального опыта, на уровне некоторых гипотез и предположений. На самом деле, результаты анализа материалов экспедиции в Аравийском море были еще весьма далеки до того, чтобы по ним можно было однозначно обнаружить существование нового типа упорядоченных динамических структур. По существу, данные первых полигонных исследований показывали наличие в мезомасштабной структуре поля скорости океанских течений только лишь некоторых признаков синоптического вихреобразования в условиях открытого океана. На полученных картах и схемах эти признаки, проявлявшиеся в виде отрывочных нелинейных участков линий тока, путем экстраполяции и интерполяции недостающих данных наблюдений позволили составить лишь предварительные предположения о пространственно-временных параметрах синоптических вихрей.

Сообщение организаторов океанологической экспедиции 1967 г. о том, что им удалось впервые обнаружить явные признаки нового, до той поры неизвестного явления в гидрофизическом режиме океана (Штокман и др., 1969), вызвало большой интерес, в том числе и у членов Научного совета по проблемам Мирового океана

Президиума Академии наук СССР. С целью уточнения и развития этого результата Институту океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР было рекомендовано продолжить исследования в данном направлении и организовать проведение специальной комплексной межведомственной экспедиции с основной задачей детального изучения динамической структуры и временной изменчивости типичного поля скорости океанского течения. Для подготовки научной программы экспедиции, организации ее методического и материального обеспечения, а также для общего руководства полевым экспериментом был сформирован штаб во главе с академиком Л.М. Бреховских – руководителем Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР. Реальная подготовка к этой экспедиции в стенах института началась весной 1968 г.

Океанский эксперимент Полигон–70

Основными организаторами этой непростой экспедиции и участниками создания ее научной программы, получившей впоследствии условное название Полигон–70, с самого начала были сотрудники ИО АН: М.Н. Кошляков, В.М. Каменкович, Л.М. Фомин, Р.В. Озмидов, с которыми сотрудничали В.А. Бурков, Н.П. Булгаков, В.И. Бышев, Ю.А. Иванов, В.Г. Нейман, В.С. Самойленко, Б.А. Тареев, К.Н. Федоров, Б.Н. Филюшкин, К.А. Чекотилло, Ю.А. Шишков, А.Д. Ямпольский и др. Деятельность этой неформальной рабочей группы на всех этапах реально объединял профессор В.Г. Корт (Прикосновение..., 2013), бывший до того в течение 12 лет директором ИО АН. Непосредственное заинтересованное участие в этой работе принимал ведущий морской гидрофизик страны, директор Института океанологии АН СССР, профессор (в последствии академик РАН) А.С. Монин, столетие со дня рождения которого будет отмечаться в 2021 г. Кроме упомянутых выше коллег, представлявших главным образом научную школу профессора В.Б. Штокмана (1909–1968 гг.), в работе по созданию научной программы эксперимента Полигон–70 приняли активное участие имевшие соответствующий опыт ведущие ученые нескольких ключевых отечественных мореведческих учреждений. В их числе были Акустический институт АН СССР, Морской гидрофизический институт АН УССР, Государственный океанографический институт Гидрометслужбы СССР, Главное управление навигации и океанографии МО СССР и др. Большую проблему представляло детальное согласование общей сводной программы эксперимента со специалистами всех заинтересованных в ее совместной реализации государственных ведомств. К сожалению, фактически каждое из них традиционно пользовалось существенно различной методикой и, что самое важное, разной приборной базой при проведении морских экспедиционных работ на своих судах. Тем не менее, ИО АН и МГИ смогли объединить свои технологические наработки в этом направлении, предложив остальным воспользоваться частью своих приборных возможностей, что было реализовано в совместной практической работе на полигоне. В обеспечение этой работы с использованием однотипного приборного

парка в конструкторских бюро этих институтов заранее был размещен заказ на изготовление необходимого количества самописцев течений и температуры, а также погружных зондов СТД, которые успешно применялись на всех судах экспедиции на протяжении всего периода полевого эксперимента.

Подходил к концу 1968 год. Подготовка к работам на полигоне в Атлантике шла полным ходом. А срок начала планируемого эксперимента Полигон–70, обозначенный как задуманное условие в самом его названии, неуклонно приближался. За оставшийся до этого момента год требовалось завершить обсуждение научной программы Проекта и утвердить ее во всех мыслимых инстанциях. Наконец, требовалось соблюсти все необходимые процедуры и добиться включения Межведомственной программы Полигон–70 в Государственный план экспедиционных исследований СССР для получения под это мероприятие соответствующего бюджетного финансирования и выделения необходимых фондов для обеспечения деятельности судов и экспедиций. Перед планирующей группой, на протяжении почти года еженедельно собиравшейся в ООФАиГ Президиума АН СССР под председательством Л.М. Бреховских, стоял ряд ключевых задач, требовавших неотложного решения. Прежде всего, следовало выбрать подходящее место проведения эксперимента. По общему мнению, оно должно было в максимальной степени соответствовать некоторым типичным условиям открытого океана: с ровным рельефом дна, с благоприятными в штормовом отношении погодными условиями, с устойчивым средним в сезонном масштабе течением, а также, что немаловажно, находиться в отдалении от оживленных навигационных трасс. Обоснованное определение места будущего полигона с соблюдением всех этих часто мало совместимых условий потребовало длительных поисков и тщательного анализа огромного количества весьма разнородных материалов наблюдений за соответствующими характеристиками океанской среды и атмосферы. В итоге был выбран, по общему мнению, оптимальный вариант места полевого эксперимента в северной субтропической части восточной Атлантики, с центральной реперной точкой на $15^{\circ}00' \text{с.ш.}, 37^{\circ}00' \text{з.д.}$

Больших творческих усилий потребовала проработка теоретической и практической характеристик пространственно-временной измерительной структуры эксперимента. Предстояло детально проследить процесс изменчивости океанского течения не только во времени, как это было свойственно существовавшей до того традиционной методике такого рода измерений, но и по пространству. Для такого эксперимента очень важно было определить расположение точек измерений таким образом, чтобы в итоге было охвачено наибольшее количество всех реальных масштабов пространственной изменчивости векторов скорости океанских течений. Здесь пригодился профессиональный опыт специалистов, занимавшихся конструированием морских гидроакустических антенн. В результате в работу была принята система расстановки основных гидрофизических станций полигона, предложенная сотрудником Акустического института АН СССР К.В. Коняевым. Система представляла собой в плане прямоугольный крест с лучами длиной около 100 км, ориентированными по сторонам света (рис. 1).

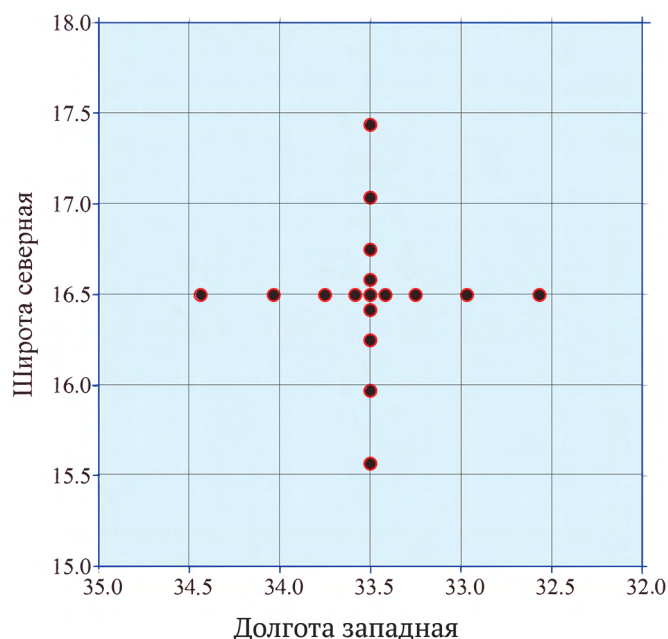


Рис. 1. Схема расположения автономных буйковых станций в эксперименте Полигон–70 (цифрами указаны градусы широт и долгот).

К концу 1969 г. все работы по подготовке крупномасштабного полевого эксперимента были успешно завершены. Вскоре после этого, в точном соответствии с Государственным Планом морских научно-исследовательских экспедиций СССР, в период с февраля по сентябрь 1970 г. в Атлантическом океане была проведена Межведомственная океанологическая экспедиция по программе, имевшей условное название Полигон–70 (Kort, Neiman, 1983). Научное руководство экспедиции осуществлялось академиком Л.М. Бреховских, его заместителем был профессор В.Г. Корт. В совместной экспедиции участвовали шесть научно-исследовательских судов (НИС), принадлежавших четырем различным ведомствам страны. Научные составы экспедиций возглавляли: НИС «Дмитрий Менделеев» – Л.М. Фомин (ИО АН), НИС «Академик Курчатов» – Г.Н. Иванов-Францкевич и К.В. Морощкин (оба ИО АН), НИС «Андрей Вилькицкий» – В.Г. Седов (ГУНиО МО СССР), НИС «Петр Лебедев» и НИС «Сергей Вавилов» – Ю.П. Лысанов (АКИН), НИС «Академик Вернадский» – П.П. Гансон (МГИ). Флагманским судном в экспедиции было НИС «Дмитрий Менделеев» (рис. 2).

Для предварительного промера глубин первым в район работ 15 февраля 1970 г. пришло экспедиционное судно «Андрей Вилькицкий». Промер показал, что район изначально был выбран неудачно, так как в его пределах обнаружили не показанное на официальных навигационных картах крупное подводное поднятие. В результате поисков более подходящей по рельефу дна площадки для полигона ее удалось отыскать в новом месте с относительно плоским дном с глубинами в пределах 5000–5500 м в той же географической зоне, но на несколько большем удалении от срединного Атлантического хребта. Таким образом, в окончательном варианте центр акватории размещения измерительной системы полигона оказался в координатах $16^{\circ}30'$ с.ш., $33^{\circ}30'$ з.д.



Рис. 2. Научно-исследовательское судно «Дмитрий Менделеев» – флагман межведомственной экспедиции по программе Полигон–70.

Основная часть программы экспериментальных работ на полигоне состояла из прямых инструментальных измерений скорости и направления течений на закоренных автономных буйковых станциях (АБС) с поверхностной плавучестью. Постановка, периодическая смена и регулярная инспекция сети этих станций выполнялись судами ИО АН и ГУНИО. Непрерывный временной ряд информации о течениях на этой измерительной сети составил около полугода. По каждому лучу условного креста выставлялось 4 станции с последующим увеличивающимся расстоянием от центрального буя в 5, 15, 32.5, 56.5 миль. На всех этих основных 17 АБС одновременно размещались по 12 автоматических самописцев течений типа БПВ с ленточным накопителем информации. Самописцы крепились на стальном тросе на стандартных горизонтах в слое 25–1500 м. В непосредственной близости от АБС №1 выставлялась дополнительная станция с глубинными самописцами течений вплоть до горизонта 4500 м. Кроме измерителей течений каждая из основных АБС оснащалась тремя автоматическими фоторегистраторами температуры воды, работавшими на горизонтах 50, 200 и 1000 м. Дискретность измерений скорости течений составляла 30 мин, температуры – 10 или 15 мин в зависимости от конструкции измерительного прибора.

Попутно отметим одно из важных в методическом плане мероприятий, выполненных на борту НИС «Академик Курчатов» в ходе подготовки к началу работ по программе Полигон–70. Здесь имеется в виду проведение международной интеркалибрации нескольких наиболее массовых в производстве и реальном применении типов самописцев течений. С этой целью при поддержке международного Совета по океанографическим исследованиям (SCOR) на судне побывала и провела соответствующую работу группа экспертов в составе 7 человек во главе с Dr. W.J. Gould

(Великобритания). Результаты этой интеркалибрации (SCOR Working Group 21, 1974) позволили, в частности, выявить приборные погрешности самописцев течений типа БПВ-2, использовавшихся в эксперименте Полигон–70, что учитывалось в процессе последующей обработки и анализе данных измерений.

В соответствии с заранее определенными обязательными методическими условиями проведения эксперимента Полигон–70, пространственная структура его измерительной системы должна была быть жестко привязана к фиксированному положению его реперной точки, в которой в реальности находилась АБС № 1. Тем не менее, по ряду причин, на практике положение этой центральной точки несколько смещалось в пространстве. Соответственно изменялись и реальные координаты всех остальных 16 АБС, а относительные расстояния между ними могли эпизодически также несколько отличаться от расчетных. Однако в действительности средняя за весь период работы полигона величина деформации его измерительной системы оказалась пренебрежимо мала по сравнению с заданными и реальными расстояниями между отдельными буйами. Следовательно, все наблюдения на буйковых станциях эксперимента Полигон–70 с полным основанием были изначально зафиксированы, оформлены и впоследствии подвергнуты совместному анализу.

Подпрограмма изучения гидрологических фоновых условий предусматривала выполнение стандартных батометрических и зондовых экспресс-съемок в районе эксперимента Полигон–70. Всеми судами экспедиции выполнялись также суточные и многосуточные гидрологические станции, на которых измерялась температура воды, а в пробах со стандартных горизонтов определялись соленость и концентрация нескольких химических величин. Для производства этих измерений применялись батометры БМ-48, снабженные глубоководными опрокидывающимися ртутными термометрами и термоглубомерами. Соленость в пробах рассчитывалась по относительной электропроводности, измерявшейся в лаборатории на борту судна с помощью солемера отечественного производства. Крупномасштабные гидрологические съемки района полигона, охватывавшие в среднем площадь более 25 000 кв. миль, выполнялись дважды с борта НИС «Академик Курчатов». Это же судно вместе с ИС «Андрей Вилькицкий», НИС «Дмитрий Менделеев» и НИС «Академик Вернадский» выполнили 4 мезомасштабные гидрологические съемки в квадрате со стороной 60 миль.

Для исследования пространственно-временной изменчивости тонкой термохалинной структуры верхнего слоя океана, в дополнение к стандартным гидрологическим площадным съемкам полигона, в тех же местах выполнялись зондовые съемки автоматическим измерителем температуры и солености «АИСТ» конструкции ИО АН и термосолезондом «ИСТОК» конструкции МГИ. Всего на полигоне было выполнено около 500 стандартных батометрических и около 200 зондовых гидрологических станций. Кроме всех этих традиционных видов гидрофизических измерений, в пределах акватории полигона и вблизи него выполнялись работы по ряду попутных программ, в том числе прецизионные промерные работы (ИС «Андрей Вилькицкий»), гравиметрические и геомагнитные съемки

(НИС «Дмитрий Менделеев»), исследования мелкомасштабной турбулентности (НИС «Академик Вернадский»), акустические измерения (НИС «Сергей Вавилов» и «Петр Лебедев»).

На всех судах экспедиции в течение всего срока регулярно велись метеорологические наблюдения. Работы на полигоне закончились снятием системы АБС и выполнением итоговой площадной гидрологической съемки района исследований. На этом полевая программа эксперимента Полигон–70 была успешно завершена, и 13 сентября 1970 г. последнее из находившихся в этом районе в составе межведомственной экспедиции научно-исследовательское судно «Академик Курчатов» покинуло его территорию.

Основной нетривиальный результат эксперимента Полигон–70

Еще в ходе экспедиции, в полевых условиях, во время предварительного знакомства в судовых лабораториях с некоторыми первыми натурными данными эксперимента Полигон–70, внимание участников экспедиции привлекло необычное, не известное ранее, поведение вектора скорости течения не только в динамически активном верхнем слое океана, но и на сравнительно больших глубинах. В полугодовых рядах данных измерений, в разных точках и на разных горизонтах можно было самым простым визуальным способом обнаружить четкие признаки квазициклических колебаний направления течения, с переменным периодом на масштабе порядка недели. Компьютерная обработка и первичный анализ совокупного шестимесячного массива данных гидрофизических наблюдений на полигоне, выполненные в период подготовки научного отчета по экспедиции под общим методическим руководством профессора М.Н. Кошлякова (Кошляков, 1973), с участием В.И. Бышева (Бышев, 1974), Ю.М. Грачева (Грачев и др., 1974), В.М. Каменковича (Каменкович и др., 1987), Л.М. Кривилевича (Василенко, Кривилевич, 1974), Е.Г. Морозова (Морозов, Плахин, 1973), Т.Б. Цыбаневой (Kamenkovich et al., 1986), А.Д. Ямпольского (Ямпольский, 1974), М.И. Яремчука (Кошляков, Яремчук, 1984) и др., полностью подтвердили достоверность вышеупомянутого результата и дали возможность сделать следующие выводы по результатам выполнения программы эксперимента Полигон–70.

Посредством прямых инструментальных измерений по программе эксперимента Полигон–70 в области Северного пассатного течения в Атлантическом океане в 1970 г. впервые в истории морской науки открыто новое гидрофизическое явление, получившее название океанских синоптических вихрей. Происхождение данного названия было связано с тем, что по своим пространственно-временным параметрам эти вихри в определенном смысле напоминали циклоны и антициклоны – ключевые энергетические факторы синоптической активности земной атмосферы (рис. 3).

Во время полугодовой работы измерительной системы полигона его акваторию пересекли и были инструментально зафиксированы пять синоптических вих-

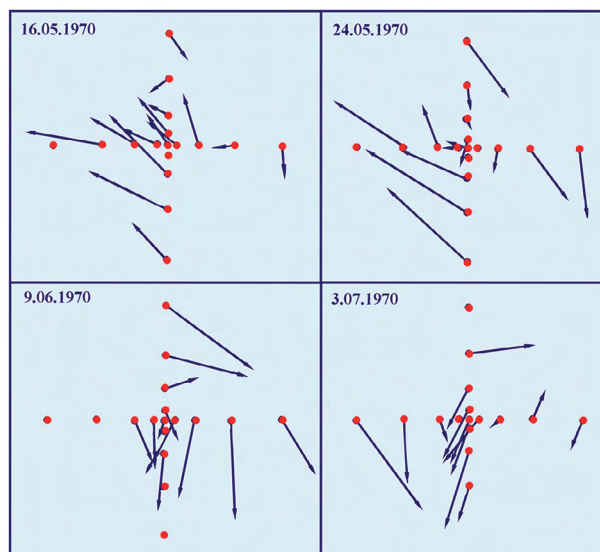


Рис. 3. Векторная схема характерного поля скорости течений на горизонте 200 м на Атлантическом Полигоне–70 (Кошляков, Грачев, 1974).

рей – два циклонических и три антициклонических. Поперечные размеры этих вихрей составляли от 100 до 200 км. Скорость вращения воды в пределах отдельных вихрей составляла около 20–25 см/сек. Все эти вихри перемещались в генеральном западном направлении со скоростью в несколько см/сек.

В отличие от хорошо известных в то время фронтальных вихрей, типа рингов Гольфстрима (Kelley, Weatherly, 1985), и открытых несколько позже (McDowell, Rossby, 1978) внутритермоклинных линзовых структур (Соколовский, Филюшкин, 2015), характеристики водных масс, переносимых обнаруженными в эксперименте Полигон–70 синоптическими вихрями, в качественном отношении ничем не отличались от окружающих вод. Тем не менее, кинематическая структура этих вихрей, как свойство определенного возмущения некоторого среднего поля скорости, отражалась на распределении основных скалярных характеристик водных масс. Это свойство дало возможность заполнять имевшиеся пробелы в структуре измерительной сети полигона путем воспроизведения динамических характеристик синоптических вихрей в геострофическом приближении. В итоге было обнаружено хорошее совпадение измеренных и расчетных характеристик реально наблюдавшихся вихрей (Грачев и др., 1974).

В динамическом отношении влияние синоптических вихрей было прослежено в толще воды, включая нижний горизонт наблюдений на глубине 1500 м. Более того, материалы наблюдений над течениями на единственной долговременной АБС № 18, оборудованной глубоководными самописцами, показали, что признаки процессов синоптического вихреобразования прослеживаются и на гораздо больших глубинах, вплоть до 4500 м. При этом обнаруживается бароклинный характер вертикальной изменчивости синоптических вихрей (Атлантический..., 1974).

В 1978 г., по представлению Академии наук СССР, синоптические вихри как уникальное природное явление были зарегистрированы в качестве откры-

тия Госкомитетом по делам открытий и изобретений СССР. Как деятели, внесшие наиболее значительный вклад в это достижение, его авторами признаны Л.М. Бреховских, В.Г. Корт, М.Н. Кошляков и Л.М. Фомин.

Продолжение эксперимента Полигон–70

Открытие и результаты предварительного исследования явления синоптического вихреобразования в рамках эксперимента Полигон–70 привели к коренному пересмотру многих гипотез и постулатов, на которые ранее опиралась динамическая океанология (Жмур, 2010). Главную роль здесь сыграл фактически неожиданно обнаруженный 50 лет тому назад факт того, что до той поры неизвестные синоптические вихри в своей совокупности содержат, ни много ни мало, основную часть (около 90%) кинетической энергии мезомасштабного поля скорости океанских течений. То есть именно тех течений, которые не в абстрактных или общих выкладках теоретиков, а фактически в реальном масштабе времени перемещают воду океана вместе со всем тем, что в ней присутствует. В итоге в численном моделировании океанических процессов появился новый продвинутый инструментарий – вихреразрешающие модели (Коротаев, 1988). Выявленные на практике реализации проекта Полигон–70 некоторые несоответствия содержания и структуры его измерительной основы по отношению к обнаруженным в эксперименте особенностям реальной физической модели синоптических вихрей потребовали неотложной организации продолжения исследований в данном направлении на более совершенном теоретическом и технологическом уровнях. В несколько последующих лет казавшийся вначале полуабстрактным сугубо отечественный термин «полигонные исследования» неожиданно получил широкое признание как в СССР, так и за рубежом. В 70-е годы прошлого столетия вслед за программой Полигон–70 было реализовано несколько принципиально подобных гидрофизических экспериментов, посвященных специальным исследованиям синоптических и других типов океанских вихрей.

Среди такого рода зарубежных проектов, направленных на изучение вихреобразования в океане и определение роли синоптических вихрей в динамике океанической циркуляции, прежде всего заслуживает упоминания весьма обстоятельная программа MODE-1 (США–Великобритания, 1971–1974 гг.). Исследования по этой программе, название которой расшифровывается как Срединно-Океанский Динамический Эксперимент, проводились с применением всех доступных океанологам современных на тот момент технических средств в западной части центральной Атлантики, в регионе Саргассова моря (Gould et al., 1979). Не вдаваясь в подробности, отметим, что американские и английские океанологи с помощью своей собственной, существенно отличной от советской, методики измерений характеристик вихревого поля скорости течений, получили данные о синоптических вихрях (MODE Group, 1978), весьма похожие на те, что ранее были получены в эксперименте Полигон–70. Иначе говоря, основной научный итог выполнения этой программы за-

ключался в принципиальном подтверждении фундаментального результата предшествующего советского проекта – открытия океанских синоптических вихрей. В итоге у советских и американских коллег-океанологов появились реальные общие научные интересы в области исследования этого одного из наиболее энергетически значимых гидрофизических явлений в Мировом океане. В результате совместных обсуждений данной проблемы в начале 70-х годов прошлого столетия возникла и была успешно реализована идея создания объединенной программы советско-американского океанского эксперимента ПОЛИМОДЕ.

Международная программа ПОЛИМОДЕ, получившая свое имя от объединения названий двух предшествующих программ Полигон–70 и МОДЕ, была успешно реализована в 1977–1979 гг. в западной Атлантике. Измерительную систему натурного эксперимента ПОЛИМОДЕ составили два блока – американский, именованный Локальным Динамическим Экспериментом (Hartline, 1979), и советский – Синоптический Динамический Эксперимент ПОЛИМОДЕ (Корт, 1979). Оба эксперимента проводились с единой целью, заключавшейся в наиболее обоснованной оценке роли синоптических вихрей открытого океана в его мезомасштабном гидрофизическом режиме. В соответствии с этой целью состав программы натуральных наблюдений в эксперименте ПОЛИМОДЕ определялся задачами поиска и измерения параметров мезомасштабных вихрей, а также исследования процессов их взаимодействия друг с другом, со струйными течениями и вихрями других типов.

Советский экспериментальный полигон ПОЛИМОДЕ в этой программе по сравнению с экспериментом Полигон–70 был в 2 раза больше как по площади, так и по продолжительности непрерывной работы (год) 19 АВС с самописцами скорости течений на 4 горизонтах в слое 100–1400 м. В американском эксперименте для исследования фазовой скорости и траекторий движения мезомасштабных вихрей впервые были применены поплавковые измерительные устройства нейтральной плавучести типа SOFAR. Последующие тщательная обработка и всесторонний совместный анализ громадного массива первичных данных наблюдений, выполненных по программе ПОЛИМОДЕ, позволили успешно решить или хотя бы приблизиться к решению поставленных в ней основных задач (Kamenkovich et al., 1983). В этих экспериментах были впервые зафиксированы и инструментально прослежены ранее неизвестные фундаментальные элементы структуры и динамики мезомасштабных течений открытого океана. К числу таких результатов относятся, например, экспериментальные оценки «плотности упаковки» синоптических вихрей, выявление физических механизмов интерференции и аннигиляции вихрей одинакового и противоположного знаков, определение картины взаимодействия вихревых структур разных типов со струйными течениями и т.д. (Атлас ПОЛИМОДЕ, 1986).

В дополнение к основным данным по мезомасштабным течениям определенное место в программе ПОЛИМОДЕ отводилось исследованию пространственно-временной изменчивости термической структуры океана в широком диапазоне масштабов. В первую очередь, с этой целью подвергались разного вида анализам

поля температуры, полученные по материалам многократных стандартных гидрофизических съемок в квадрате $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ на полигоне советского эксперимента ПОЛИМОДЕ. Расчеты дисперсии распределений температуры поверхностного слоя океана по данным наблюдений продолжительностью в несколько суток на акваториях с линейными размерами порядка 100 км показали, что в данном случае синоптическая мода изменчивости термохалинных характеристик водных масс в слое главного термоклина является преобладающей. Причем по абсолютной величине пространственная дисперсия температуры воды в пределах мезомасштаба оказывается на порядок больше временной.

В этой связи отдельное внимание обратил на себя один из весьма нетривиальных результатов термических зондовых съемок, проявившийся как в эксперименте Полигон-70, так и на полигоне ПОЛИМОДЕ. Этот весьма необычный результат представляли максимальные амплитуды соответствующих вертикальных смещений отдельных изотерм (Морозов, Никитин, 1981) в слое 200–500 м, где параллельно была обнаружена максимальная завихренность в поле скорости, проявляющаяся в виде положительного экстремума дисперсии ее модуля и направления (Бышев, Нейман, 1981) (рис. 4).

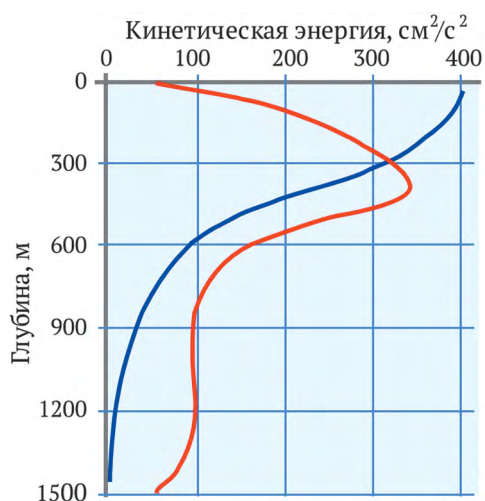


Рис. 4. Вертикальное распределение кинетической энергии синоптических возмущений скорости мезомасштабного течения (Бышев, Нейман, 2013).

Красная кривая – эксперимент ПОЛИМОДЕ, июль–сентябрь 1978 г,
синяя кривая – типичный «холодный» ринг Гольфстрима.

На рис. 4 показаны рассчитанные по данным ПОЛИМОДЕ распределения по глубине кинетической энергии синоптических возмущений, где кривая для типичного ринга Гольфстрима приведена лишь для качественного сопоставления. Сравнивая вертикальные распределения кинетической энергии в ринге и в синоптических вихрях, можно определить отличительную особенность последних, у которых максимум этой энергии наблюдается не в поверхностном слое, а на глубинах 200–500 м. Это обстоятельство послужило хотя и косвенным, но вполне убедительным

основанием для того, чтобы в общем случае не связывать напрямую происхождение океанских синоптических вихрей с фрикционным эффектом атмосферного воздействия на его свободную поверхность.

Таким образом, натурные данные советско-американского эксперимента ПОЛИМОДЕ полностью подтвердили принципиальные результаты по исследованию синоптических вихрей, полученные отечественными учеными в 1970 г. в эксперименте Полигон–70, что позволило существенно уточнить и дополнить его данные (Robinson, 1980).

Далее, в приводимом здесь перечне советских океанских «полигонных» исследований следует обратить внимание на выполненный ИО АН в 1985 г. в восточной части тропической Атлантики очередной крупномасштабный эксперимент Мезополигон–85 (Гидрофизические..., 1988), проведенный с одновременным участием сразу трех НИС – «Витязь», «Академик Мстислав Келдыш» и «Академик Курчатов». Чтобы представить себе грандиозный масштаб этого натурного океанского эксперимента, достаточно напомнить, что на первом его этапе в продолжении месяца скорость течений синхронно регистрировали 75 АБС, установленных в квадрате полигона размером 80 на 80 морских миль. Место для данного эксперимента выбирали специально посредством предварительной поисковой гидрофизической зондовой экспресс-съемки. Целью этого поиска и общей задачей всей экспедиции являлось обнаружение, оконтуривание и приборное исследование в то время малоизученного элемента вихревой гидродинамической структуры – внутритермоклинной линзы средиземноморской воды (Федоров, 1986), периодически порционно поступающей в северную Атлантику через Гибралтарский пролив, как через гигантскую воронку. Такая структура была обнаружена, и затем в процессе гидрофизических съемок были детально зафиксированы все основные скалярные и векторные ее характеристики. Линза охватывала слой 800–1300 м. По своим пространственным и динамическим характеристикам эта гидрофизическая структура весьма напоминала типичный синоптический вихрь – около 100 км в поперечнике, скорость течений в 5–10 милях от центра линзы – около 25 см/сек, фазовая скорость перемещения линзы около 1 мили/сутки. Однако термохалинная структура линзы, в отличие от синоптического вихря открытого океана, имела иные характеристики по сравнению с окружающей водной массой. Вследствие этого аномалии температуры и солёности в ядре линзы относительно фоновых вод составляли $+4^{\circ}$ и 0.8 епс, причем объем средиземноморской воды в линзе составлял около 420 км³. Замечательные гидрофизические особенности данного типа мезомасштабных вихревых структур в Атлантическом океане, имеющих средиземноморское происхождение, впоследствии неоднократно регистрировались и были подробно изучены как в теории, так и в натурных экспериментах (Соколовский, Филюшкин, 2015). К этому остается только добавить, что присутствие в Мировом океане внутритермоклинных линз вихревого типа не ограничивается акваторией Атлантики. Известны случаи, когда подобные мезомасштабные гидрофизические структуры обнаруживались также в Индийском и Тихом океанах (Максименко, 1993).

Существенное увеличение пространственного разрешения и придание свойства подвижности измерительной системе проекта Мезополигон–85, по сравнению с экспериментом Полигон–70, позволили в экспедиции ИО АН 1985 г. впервые в отечественной практике инструментально зафиксировать в кинематической структуре океанских течений существование субмезомасштабных вихрей – сравнительно короткоживущих и меньших по размеру, чем синоптические вихри. В данном случае имеется в виду прослеживание в океане проявления процесса «каскадного» вихребразования, в результате которого относительно крупные синоптические, или мезомасштабные, вихри распадаются на более мелкие – субмезомасштабные. Нечто подобное в свое время отмечалось, например, мористее правой периферии Гольфстрима (Robinson et al., 1979), а также в регионе Черного моря (Зацепин и др., 2011), то есть, еще ранее, либо позднее эксперимента Мезополигон–85.

Наконец, в заключение, следует назвать еще одну, последнюю по времени и наиболее грандиозную среди всех отечественных океанологических «полигонных» программ по масштабу задействованной измерительной аппаратуры, – проект Мегаполигон–87 (Иванов, 1992; Maximenko et al., 2001), организованный и проведенный по инициативе и под руководством академика А.С. Мони́на. Исследования выполнялись летом 1987 г. в северо-западной части Тихого океана в районе зоны квазистационарного Субполярного фронта, расположенного к северу от основного потока вод Курошио (рис. 5).

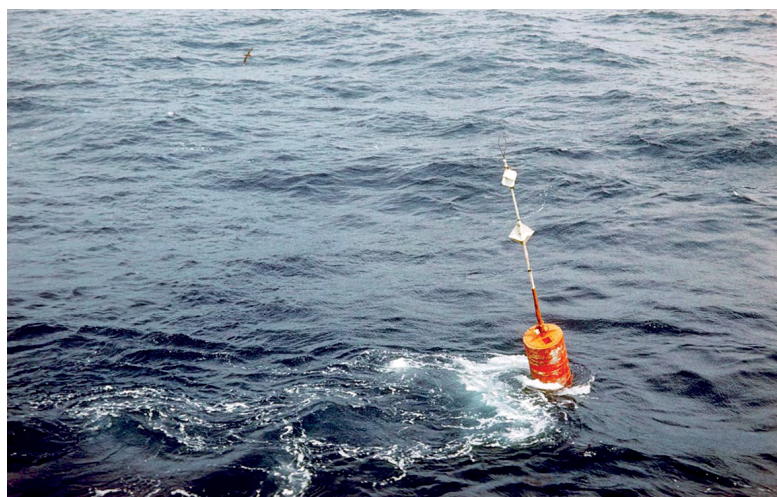


Рис. 5. Тихий океан, 1987 г. Эксперимент Мегаполигон–87, постановка автономной буйковой станции.

В обеспечивающей этот проект экспедиции приняли участие 11 советских судов. Всего на экспериментальном полигоне размером около 850000 кв. км одновременно в течение двух с половиной месяцев работали 177 буюв с самописцами, измерявшими скорость течений и температуру воды в слое 0–4500 м с дискретностью 15 мин. Не менее важное место в программе эксперимента имели шесть многосудовых (квазисинхронных) гидрологических съемок, охватывающих всю площадь по-

лигона с буйами. Использование значительно более частой и регулярной сетки буйев в эксперименте Мегаполигон–87, по сравнению со всеми предшествовавшими подобного типа исследованиями, позволило существенно уточнить и во многом дополнить представление ученых о происхождении и динамике океанских синоптических вихрей, их взаимодействии между собой и со струйными океанскими течениями. Расчеты дисперсии термических характеристик поверхностного слоя океана по данным контактных наблюдений продолжительностью в несколько суток на полигонах с линейными размерами порядка 100 км показали, что синоптическая мода изменчивости поля температуры является в пределах данных масштабов преобладающей.

Заключение

1970 г. занимает особое место в хронологии жизни Института океанологии им. П.П. Ширшова. Более того, он оставил свой весьма заметный след во всей отечественной и мировой науке о Земле. В том году, полстолетия тому назад, в нашей стране был задуман и успешно осуществлен грандиозный океанский эксперимент, получивший название Полигон–70. Реализация этой программы, первоначально нацеленной на изучение пространственно-временной структуры Северного Пассатного течения в Атлантическом океане, в итоге привела к неординарному событию в океанологии – открытию в океане ранее неизвестного ученым класса долгоживущих динамических структур, обладающих большой кинетической энергией. По своим основным параметрам эти вихреподобные образования напоминали циклоны и антициклоны в атмосфере. Отсюда появилось их наименование – синоптические вихри открытого океана (Нелепо и др., 1988). Открытие явления синоптических вихрей было удостоено официальной регистрации в государственном Комитете по делам изобретений и открытий СССР за № 207 от 23 ноября 1978 г. (авторы – Л.М. Бреховских, В.Г. Корт, М.Н. Кошляков, Л.М. Фомин). Уникальный результат, полученный в рамках программы Полигон–70, вызвал огромный интерес мирового океанологического сообщества. Вслед за этой программой в последующие два десятилетия был выполнен на более совершенном методическом уровне целый ряд подобных по целям и задачам специальных океанских экспериментов, завершившийся отечественным межведомственным проектом Мегаполигон–87, реализованном в 1987 г. в западной части Тихого океана в районе Курошио. О масштабе этой работы можно судить хотя бы по тому, что в ней были задействованы 11 НИС, выполнявших квазисинхронные съемки полигона размером 300×300 миль, на котором одновременно измерялись течения на 177 якорных буйковых станциях.

На основе общего совокупного результата всех вышеупомянутых программ к концу прошлого столетия удалось обнаружить, экспериментально и теоретически исследовать и дать концептуальное научное описание фактически всех реальных энергетически значимых типов вихревых структур открытого океана.

Однако Мировой океан настолько велик, что количество научных вопросов к нему со временем почти не уменьшается. Так что современным океанологам еще долго будет чем заниматься.

Благодарности. Источник финансирования. Работа поддержана госзаданием № 0149-2019-0004.

Литература

- Атлантический Гидрофизический Полигон–70 / Под ред. В.Г. Корта, В.С. Самойленко. М.: Наука, 1974. 320 с.
- Атлас ПОЛИМОДЕ / Ред. А.Д. Вулис, В.М. Каменкович и А.С. Монин. США: Вудс Холл, 1986. 375 с.
- Бышев В.И.* Программа статистического анализа наблюдений, выполненных на Атлантическом гидрофизическом полигоне. Атлантический Гидрофизический Полигон–70. М.: Наука, 1974. С. 305–314.
- Бышев В.И., Нейман В.В.* Статистические оценки горизонтальной структуры синоптических возмущений открытого океана // *Океанологические исследования*. 1981. № 34. С. 23–32.
- Бышев В.И., Нейман В.Г.* Экспериментальные оценки синоптической изменчивости гидрофизических характеристик открытого океана. Прикосновение к океану. М.: Ин-т компьютер. иссл., 2013. 189 с.
- Василенко В.М., Кривилевич Л.М.* Статистические характеристики течений по данным наблюдений на Атлантическом полигоне // *Исследование изменчивости гидрофизических полей в океане*. М.: Наука, 1974. С. 76–83.
- Гидрофизические исследования по программе «МЕЗОПОЛИГОН» / Ред. В.Г. Корт. М.: Наука, 1985. 264 с.
- Грачев Ю.М., Кошляков М.Н., Нейман В.Г., Тарасенко В.М.* Мезомасштабные геострофические течения на полигоне в тропической части Северной Атлантики. Атлантический Гидрофизический Полигон–70. М.: Наука, 1974. С. 193–197.
- Жмур В.В.* Мезомасштабные вихри океана. Москва: ГЕОС, 2010. 290 с.
- Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2001. Т. 1. № 4. С. 592–605.
- Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 511 с.
- Кортаев Г.К.* Теоретическое моделирование синоптической изменчивости океана на возмущения атмосферы. Киев: Наукова Думка, 1988. 158 с.
- Корт В.Г.* Международный крупномасштабный океанический эксперимент POLYMODE // *Океанологические исследования*. Москва: Советское радио, 1979. № 30. С. 5–9.
- Кошляков М.Н.* Результаты наблюдений на атлантическом полигоне 1970 г. в свете некоторых моделей свободных волн Россби // *Океанология*. 1973. Т. 13. № 5. С. 760–767.
- Кошляков М.Н., Грачев Ю.М.* Среднемасштабные течения на гидрофизическом полигоне в тропической Атлантике. Атлантический Гидрофизический Полигон–70. М.: Наука, 1974. С. 163–180.
- Кошляков М.Н., Яремчук М.И.* О генерации синоптических океанских вихрей в районе «ПОЛИГОНА-70» // *Известия АН СССР. Серия ФАО*. 1984. Т. 20. № 8. С. 749–753.
- Кошляков М.Н.* Открытие и исследование вихрей открытого океана // *Изв. РАН, Серия ФАО*. 2002. Т. 38. № 6. С. 770–783.
- Максименко Н.А.* Внутритермоклинная линза в северо-западной части Тихого океана // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 3. С. 333–339.

- Монин А.С., Солнцева Н.И. Жизнь и разум. М.: Наука, 2007. 168 с.
- Морозов Е.Г., Плахин Е.А. Некоторые результаты анализа температурных колебаний на гидрофизическом полигоне в Тропической Атлантике // Известия АН СССР. Серия ФАО. 1978. Т. 14. № 3. С. 340–342.
- Морозов Е.Г., Никитин С.В. Дисперсионное соотношение для внутренних гравитационных волн и их вертикальной структуры в районе ПОЛИМОДЕ // Океанологические исследования. 1981. № 34. С. 78–84.
- Нелено Б.А., Булгаков Н.П., Коротаев Г.К. и др. Синоптические вихри в океане. Киев: Наукова Думка, 1988. 288 с.
- Прикосновение к океану / Ред. Е.Г. Морозов, В.Г. Нейман. М.: Ин-т компьютер. иссл., 2013. 189 с.
- Соколовский М.А., Филюшкин Б.Н. Взаимодействие между синоптическими вихрями и внутритермоклинными линзами // Океанология. 2015. Т. 55. №. 5. С. 731–737.
- Федоров К.Н. (ред.) Внутритермоклинные вихри в океане. М.: ИО АН, 1986. 142 с.
- Штокман В.Б., Кошляков М.Н., Озмидов Р.В., Фомин Л.М., Ямпольский А.Д. Длительные измерения физических полей на океанических полигонах как новый этап в исследовании океана // ДАН СССР. 1969. Т. 186. № 5. С. 70–73.
- Ямпольский А.Д. Об инерционных колебаниях в поле скорости течений. Атлантический Гидрофизический Полигон–70. М.: Наука, 1974. С. 189–192.
- Brekhovskikh L.M., Fedorov K.N., Fomin L.M., Koshlyakov M.N. Large-scale multiple-buoy experiment in the tropical Atlantic // Deep-Sea Research. 1971. Vol. 18. P. 1189–1206.
- Gould J., Dickson R., Muller J., Maillard C. Measurements of mesoscale variability in the northeast Atlantic // Process-Verbaux. No. 15. Canberra: JAPSO-UNESCO, 1979. 101 p.
- Hartline B.K. POLYMODE – Exploring the undersea weather // Science. 1979. Vol. 205. P. 571–573.
- Ivanov Yu.A. Physical Oceanography: a Review of Recent Soviet Research // Oceanus. 1991. Vol. 14. No. 2, P. 81–86.
- Kamenkovich V.M., Larichev V.D., Kharkov B.V., Grachev Y.M., Tsybaneva T.B. Prediction synoptic motions in the POLYMODE region using a baroclinic model // Oceanology. 1986. Vol. 26. No. 5. P. 547–552.
- Kelley E.A., Weatherly G.L. Abyssal eddies near the Gulf Stream // J. Geophysical. Res. 1985. Vol. 90. No. 2. P. 3151–3160.
- Kort V.G., Neiman V.G. Atlantic Hydrophysical Polygon-1970. In: Atlantic Hydrophysical Polygon–70. New Delhi, Amerind Co: Oxonian Press Ltd., 1983. P. 1–20.
- Maximenko N.A., Koshlyakov M.N., Ivanov Y.A., Yaremchuk M.I., Panteleev G.G. Hydrophysical experiment «Megapolygon-87» in the northwestern Pacific Subarctic frontal zone // J. Geophysical. Res. 2001. Vol. 106. P. 14143–14163.
- McDowell S., Rossby T. Mediterranean Water: An intense mesoscale eddy of the Bahamas // Science. Vol. 202. 1978. P. 1085–1086.
- MODE Group. The Mid-Ocean Dynamics Experiment // Deep Sea Res. 1978. Vol. 25. P. 859–910.
- Robinson A.R., Harrison D.B., Heidvogel D.B. Mesoscale eddies and general ocean circulation models // Dynamics of Atm. Ocean. 1979. No. 3. P. 143–180.
- Robinson A.R. Dynamics of Ocean Current and Circulation: Results of POLYMODE and Related Investigations. Cambridge: MIT 02139 USA, 1980. 31 p.
- SCOR Working Group 21. An intercomparison of some current meters: Report on an Experiment carried out from the Research Vessel Akademik Kurchatov, Mar.–Apr., 1970. UNESCO Technical Paper in Marine Sciences, 1974. No. 17. 116 p.

**THE POLYGON–70 EXPERIMENT. BEGINNING OF A NEW STAGE
IN THE HYDROPHYSICAL STUDIES OF THE WORLD OCEAN
(TO THE 50th ANNIVERSARY OF THE DISCOVERY
OF OCEANIC SYNOPTIC VORTICES)**

Neiman V.G., Morozov E.G.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: vneiman2007@yandex.ru*

Submitted 19.05.2020, accepted 15.06.2020.

Fifty years ago, in 1970, open ocean eddies of the synoptic scale were experimentally found during the expedition within the Soviet Oceanographic Program Polygon–70 carried out in the subtropical zone of the North Atlantic. This turned out to be one of the most significant events in oceanology of the twentieth century. Unlike the previously known similar circulation structures that usually separated from large-scale jet streams, the newly discovered eddies were free, that is, they had essential inertial wave character. The velocities in such eddies often exceeded the mean mesoscale ocean current velocity. By analogy with cyclones and anticyclones in the atmosphere, free eddies of the open ocean, which have spatial and temporal scales similar to the atmospheric eddy formations, were called SYNOPTIC eddies. This term is used in the Russian literature. The history of the Polygon–70 experiment and its main results are described. Brief information is given about other major international and that of Shirshov Institute of Oceanology “polygon” programs for the study of mesoscale eddies.

Keywords: ocean, study site (polygon), synoptic eddies, current, velocity, temperature, mooring, ring, frontal eddies

Acknowledgments: This work was supported by state assignment No. 0149-2019-0004.

References

- Atlanticheskii Gidrofizicheskii Polygon–70 (Atlantic Hydrophysical Polygon–70). Moscow: Nauka, 1974, 320 p.
- Brekhovskikh L.M., Fedorov K.N., Fomin L.M., and Koshlyakov M.N.* Large-scale multiple-buoy experiment in the tropical Atlantic. *Deep-Sea Research*, 1971, Vol. 18, pp. 1189–1206.
- Byshev V.I.* Programma statisticheskogo analiza nabliudeniya, vipolnennih na Atlanticheskom gidrofizicheskom polygone (Program of statistical analysis of observations performed on Atlantic hydrophysical polygon). Atlanticheskii Gidrofizicheskii POLYGON–70. Moscow: Nauka, 1974, pp. 305–314.
- Byshev V.I. and Neiman V.G.* Statisticheskie otsenki gorizontальной struktury sinopticheskikh vozmushcheniy otkritogo okeana (Statistical estimation of horizontal structure of open ocean synoptical whirls). *Journal of Oceanological Research*, 1981, No. 34, pp. 23–32.
- Byshev V.I. and Neiman V.G.* Eksperimentalnye otsenki sinopticheskoy izmenchivosti gidrofizicheskikh harakteristik otkritogo okeana (Experimental evaluation of synoptical variability of open ocean hydrophysical characteristics): Prikosnovenie k okeanu. Moscow: Inst. Komput. Issl., 2013, pp. 67–75.

- Gidrofizicheskie issledovaniya po programme «MEZOPOLYGON» (Hydrophysical investigation under the program «MESOPOLYGON» (ed. Kort V.G.)). Moscow: Nauka, 1985, 264 p.
- Fedorov K.N. (ed.). Vnutrermoklinnye vikhri v okeane, Moscow: IO AN, 1986, 142 p.
- Gould J., Dickson R., Muller J., and Maillard C. Measurements of mesoscale variability in the northeast Atlantic. *Proces-Verbaux*, No. 15, Canberra: JAPSO-UNESCO, 1979, 101 p.
- Grachev Ju.M., Koshlyakov M.N., Neiman V.G., and Tarasenko V.M. Mezomashtabnie geostroficheskie techeniya na polygone v tropicheskoy chasti Severnoy Atlantiki (Mesoscale geostrophical currents in tropical part of the Northern Atlantic Ocean): Atlanticheskiy Gidrofizicheskiy POLYGON–70. Moscow, 1974, pp. 193–197.
- Hartline B.K. POLYMODE – Exploring the undersea weather. *Science*, 1979, Vol. 205, pp. 571–573.
- Ivanov Yu.A. Physical Oceanography: A Review of Recent Soviet Research. *Oceanus*, Vol. 14, No. 2, 1991, pp. 81–86.
- Kamenkovich V.M., Larichev V.D., Kharkov B.V., Grachev Y.M., and Tsybaneva T.B. Prediction synoptic motions in the POLYMODE region using a baroclinic model. *Oceanology*, 1986, Vol. 26, No. 5, pp. 547–552.
- Kamenkovich V.M., Koshlyakov M.N., and Monin A.S. Sinopticheskie vikhri v okeane (Synoptic eddies in ocean). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 511 p.
- Kelley E.A. and Weatherly G.L. Abyssal eddies near the Gulf Stream. *J. Geophysical. Res.*, 1985, Vol. 90, No. 2, pp. 3151–3160.
- Korotaev G.K. Teoreticheskoe modelirovanie sinopticheskoy izmenchivosti okeana (Theoretical simulation of ocean synoptical variability). Kiev: Naukova Dumka, 1988, 158 p.
- Kort V.G. Mezhdunarodnyy krupnomasshtabnyy okeanicheskiy eksperiment POLYMODE. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1979, No. 30, Moscow, pp. 5–9.
- Kort V.G. and Neiman V.G. Atlantic Hydrophysical Polygon-1970. In: Atlantic Hydrophysical Polygon–70. New Delhi, Amerind Co.: Oxonian Press Ltd., 1983, pp. 1–20.
- Koshlyakov M.N. Resultati nablyudeniya na Atlanticheskom Polygone–70 v svete nekotorykh modeley svobodnykh voln Rossbi (Observational results on Atlantic Polygon–70 using some models of free Rossby waves). *Okeanologiya*, 1973, Vol. 13, No. 5, pp. 760–767.
- Koshlyakov M.N. and Grachev Ju.M. Srednemashtabnie techeniya na gidrofizicheskom polygone v tropicheskoy Atlantike, Atlanticheskiy Gidrofizicheskiy POLYGON–70. Moscow: Nauka, 1974, pp. 163–180.
- Koshlyakov M.N. and Yaremchuk M.I. O generatsii sinopticheskikh okeanskiykh vikhrey v rayone «POLIGONA-70» (On synoptic ocean eddies formation at «Polygon–70» area). *Izvestia AN SSSR, seriya FAO*, 1984, Vol. 20, No. 8, pp. 749–753.
- Koshlyakov M.N. Discovery and investigations of open ocean synoptic eddies. *Okeanologiya*, 2002, Vol. 38, No. 6, pp. 770–783.
- Maximenko N.A., Koshlyakov M.N., Ivanov Y.A., Yaremchuk M.I., and Panteleev G.G. Hydrophysical experiment «Megapolygon–87» in the northwestern Pacific Subarctic frontal zone. *J. Geophysical. Res.*, 2001, Vol. 106, pp. 14143–14163.
- McDowell S. and Rossby T. Mediterranean Water: An intense mesoscale eddy of the Bahamas. *Science*, 1978, Vol. 202, pp. 1085–1086.
- MODE Group. The Mid-Ocean Dynamics Experiment. *Deep Sea Res.*, 1978, Vol. 25, pp. 859–910.
- Monin A.S. and Solntseva N.I. Jizn i razum (A life and mentality). Moscow: Nauka, 2007, 168 p.
- Morozov E.G. and Plakhin E.A. Nekotorye resultati analiza temperaturnykh kolebaniy na gidrofizicheskom polygone v Tropicheskoy Atlantike (Some results of temperature variation analysis at hydrophysical polygon in Tropical Atlantic). *Izvestia AN SSSR, seriya FAO*, 1978, Vol. 14, No. 3, pp. 340–342.

- Morozov E.G. and Nikitin S.V.* Dispersionnoe sootnoshenie dlia vnutrennih gravitatsionnih volni i ih vertikalnoy strukturi v rayone POLYMODE (Dispersion relation for inner gravity waves and their vertical structure in region of POLYMODE). *Journal of Oceanological Research*, 1981, No. 34, pp. 78–84.
- Nelepo B.A., Bulgakov N.P., and Korotaev G.K.* Sinopticheskie vihri v okeane (Synoptical whirls in ocean). Kiev: Naukova Dumka, 1988, 288 p.
- POLYMODE ATLAS. (ed. Vulis A.D., Kamenkovich V.M., and Monin A.S.). Woods Hole, USA, 375 p.
- Prikosnovenie k Okeanu (Touching the Ocean). Ed. Morozov E.G., Neiman V.G. Moscow: Institut kompyuternih. issl., 2013, 189 p.
- Robinson A.R., Harrison D.B., and Heidvogel D.B.* Mesoscale eddies and general ocean circulation models. *Dynamics of Atm. Ocean*, 1979, No. 3, pp. 143–180.
- Robinson A.R.* Dynamics of Ocean Current and Circulation: Results of POLYMODE and Related Investigations, Cambridge: MIT 02139 USA, 1980, 31 p.
- SCOR Working Group 21. An intercomparison of some current meters: Report on an Experiment carried out from the Research Vessel Akademik Kurchatov, Mar.–Apr. 1970. UNESCO Technical Paper in Marine Sciences, 1974, No. 17, 116 p.
- Shtokman V.B., Koshlyakov V.N., Ozmidov R.V., Fomin L.M., and Yampolskiy A.D.* Dlitelnie izmereniya fizicheskikh poley na okeanicheskikh polygonah kak noviy etap v issledovanii okeana (Long-term observing the physical fields on oceanic polygons as a new stage of ocean study). *DAN SSSR*, Vol. 186, No. 5, 1969, pp. 70–73.
- Sokolovskiy M.A. and Filyushkin B.N.* Vzaimodeistvie mezdu sinopticheskimi vihriavi i vnutrtermoklinnimi linzami (Interaction between synoptical eddies and thermocline lenses). *Okeanologia*, Vol. 55, No. 5, 2015, pp. 731–737.
- Vasilenko V.M. and Krivilevich K.M.* Statisticheskie harakteristiki techeniy po dannim nablyudeniy na Atlanticheskoy polygone (Statistical characteristics of sea currents estimated by observational data of Atlantic polygone). *Issledovanie izmenchivosti gidrofizicheskikh poley v okeane*, Moscow: Nauka, 1974, pp. 76–83.
- Yampolskiy A.D.* Ob inertsiionnih kolebaniyah v pole skorosti techeniy (On inertial variability in sea current velocity). *Atlanticheskoy Gidrofizicheskiy POLYGON-70*. Moscow: Nauka, 1974, pp. 189–192.
- Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzsh A.O., Kremenetskiy V.V., Ostrovskiy A.G., and Solovyev D.V.* Submesomashtabnie vihri na Kavkazskom shelfe Chernogo moria i porozdayushchie ih mehanizmi (Sub-mesoscale eddies on Kaukas shelf of the Black Sea and their generation mechanisms). *Okeanologiya*, 2001, Vol. 1, No. 4, pp. 592–605.
- Zhmur V.V.* Mezomashtabnie vihri okeana (Mesoscale ocean whirls). Moscow: GEOS, 2010, 290 p.