

УДК 551.465

ПОЛИГОН-70: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ В СВЕТЕ НОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВНУТРЕННИХ ВОЛНАХ

© 2020 г. Е. Г. Морозов*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., 36, Москва, 117997 Россия

**E-mail: egmorozov@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.01.2020 г.

После доработки 11.03.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2020 г.

Анализируются наши представления о динамике океана и, в частности, о внутренних приливных волнах, которые изменились за 50 лет, прошедшие после эксперимента Полигон-70. После Полигона-70, мы поняли, что существуют вихри открытого океана, и течения в этих вихрях зачастую превышают средние течения. Мы поняли, что внутренние приливы генерируются в результате взаимодействия баротропного прилива с неровностями топографии и распространяются в виде возмущений скорости, температуры и солёности вдоль характеристических поверхностей. Внутренние волны заполняют всю толщу океана, а не ограничиваются колебаниями слоя скачка. Интерпретация данных измерений внутренних волн, которые были получены и опубликованы в 1970-х годах, пересмотрена и представлена в свете новых знаний.

Ключевые слова: Полигон-70, внутренние волны, характеристическое уравнение, топография дна, генерация внутренних приливов

DOI: 10.31857/S0002351520040070

1. ВВЕДЕНИЕ.

ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА ПОЛИГОН-70

В период с февраля по октябрь 1970 г. АН СССР был проведен уникальный океанский гидрофизический эксперимент Полигон-70. В 2020 г. исполняется полвека этому научному подвигу, который навсегда занял почетное место в истории океанологии. В планах этого эксперимента было формально отмечено, что будут исследованы проблемы пространственно-временной изменчивости океанологических полей, изучены термохалинная структура вод и взаимодействие океана и атмосферы. За этими общими словами тогда не был виден основной результат: открытие синоптических (мезомасштабных) вихрей открытого океана, а также тот факт, что флуктуации полей скорости на этом масштабе могут многократно превосходить средние течения, и что синоптические вихри открытого океана являются проявлениями волн Россби [1]. Об этом тогда только были догадки в умах тех, кто задумывал Полигон-70.

В экспедиции участвовали шесть судов различных институтов: “Дмитрий Менделеев”, “Академик Курчатов”, “Андрей Вилькицкий” и другие. На семнадцати буйковых станциях были проведены измерения течений приборами БПВ-2 и температуры фототермографами. Производилась регулярная (примерно через 22–25 сут работы) смена буев, поскольку троса не выдерживали длительной рабо-

ты. Районом измерений был выбран квадрат размером 120 на 120 морских миль в центре северо-восточной Атлантики в глубоководной котловине, которая носит название котловина Кабо Верде или абиссальная равнина Гамбия. Географическое положение полигона, а также гидрофизические условия должны были соответствовать некоторому среднему состоянию открытого океана. Предполагалось, что рельеф дна океана в выбранном районе полигона будет относительно ровным. Первоначально центр полигона был намечен в точке 15°00′ с.ш., 37°00′ з.д. Рекогносцировочный промер на судне “Андрей Вилькицкий”, который был проведен с 15 февраля 1970 г., показал, что этот район не совсем удачный в смысле рельефа дна, поэтому 23 февраля был проведен промер в новом районе и выбрана центральная точка полигона 16°30′ с.ш., 37°30′ з.д. Глубины здесь были в пределах 5000–5500 м. Карты топографии дна по всему полигону не было.

В конце февраля начались постановки буйковых станций. С интервалом около 22–25 сут буйковые станции менялись. Новые буи ставились на расстоянии около 2 миль от сменяемого бую. Период совместной работы буюв во время замены буюв составлял 2–3 ч.

Основной целью эксперимента было изучить пространственно-временную изменчивость полей течений, температуры и солёности. Экспери-

мент не был направлен на изучение внутренних волн, но внутренние волны являются одним из механизмов изменчивости гидрофизических полей и должны изучаться вместе с другими механизмами изменчивости.

Наши знания о внутренних волнах к этому времени были весьма скудны. Модель Гарретта–Манка, описывающая фоновое состояние поля внутренних волн, появилась только в 1972 г. [2]. Авторы представили модель безразмерной энергии внутренних волн, из которой получались наблюдаемые спектры колебаний температуры и течений на заякоренных буях и спектры, измеряемые буксируемыми приборами. Мало кто думал о существовании внутренних приливов. Об этом крайне скудно и не очень информативно было написано в книге В. Краусса на немецком языке [3], а ее русский перевод появился несколько лет спустя. Была работа В. Манка [4] о влиянии приливов на всю динамику океана, но она еще не была глубоко осознана. Представление о том, что максимальные возмущения, связанные с внутренними волнами, сосредоточены на поверхностях, которые позднее назвали характеристическими, не было глубоко понято. Распространение внутренних возмущений вдоль наклонных характеристических поверхностей (которые попадают в категорию аттракторов, то есть происходит концентрация возмущений около специфических траекторий) было впервые описано в работах Филлипса [5], а потом в работах [6, 7]. Экспериментальное подтверждение наличия максимальных возмущений, связанных с внутренними волнами, на характеристических поверхностях было опубликовано в [8]. Понятно, что этот механизм не был известен к началу Полигона-70, равно как и современные идеи об аттракторах развивались позднее [9–11]. В более широком смысле понятие аттрактора формулируется как компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при достаточно длительном времени.

2. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРУКТУРЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Ранее представлялось, что внутренние волны существуют, в основном, в сезонном скачке плотности, и поэтому изучались колебания температуры именно там. Пересчет колебаний температуры в вертикальные смещения путем деления флуктуаций температуры на вертикальный градиент температуры не делался. Первоначально на Полигоне-70 измерения флуктуаций температуры задумывались на горизонтах 50, 100 и 1000 м. После первой смены буев часть приборов была утрачена, а флуктуации температуры на горизонте 1000 м показались незначительными, и измере-

ния там были прекращены. Как потом оказалось именно на этих глубинах были максимальные амплитуды вертикальных смещений за счет полусуточных приливных волн.

К 1970 г. еще не сформировалось теоретическое представление о структуре внутренних волн: амплитудах вертикальных смещений и распределении вертикальных скоростей. Как было показано позже, “типичную” структуру внутренних волн можно описать с помощью решения дифференциального уравнения второго порядка для вертикальной скорости w с нулевыми граничными условиями на поверхности и дне [3, 7]:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{g} \frac{dw}{dz} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} k_x^2 w = 0, \quad (1)$$

$$w = 0 \quad \text{при} \quad z = 0, \quad z = H, \quad (2)$$

где $N(z)$ – частота Брента–Вяйсяля, ω – частота волны, f – параметр Кориолиса, k_x – волновое число по горизонтали, H – глубина моря.

Формулируя на основе (1)–(2) спектральную задачу и предполагая $\omega^2 - f^2 > 0$, можно получить набор собственных чисел, характеризующих частоту колебаний внутренних волн и собственных функций, описывающих их поведение по вертикали [3,7].

Первыми отечественными публикациями о внутренних волнах были работы К.Д. Сабинина. Он был опубликован только в 1970-х годах. Книга Ю.З. Миропольского [12] тоже появилась много позднее. Пожалуй, единственной, была работа Б.А. Тареева [13] о внутренних волнах, но она пока не ассоциировалась с приливными внутренними волнами. Один из выводов этой работы о форме собственной функции уравнения для вертикальных смещений и о том, что максимум вертикальных смещений находится примерно на середине глубины, тогда не связывался с измерениями этих смещений на глубине 1000 м. А этот максимум и находился в районе Полигона-70 на глубине около 1000–1200 м. Флуктуации температуры по данным измерений на Полигоне-70 на горизонте 1000 м были действительно небольшие, но регулярные. При делении на вертикальный градиент температуры амплитуды составляли 25–30 м.

Блестящий в техническом смысле американский эксперимент по внутренним волнам IWEX был проведен в 1973 г. [14]. Пирамидальная конструкция с одной плавучестью на трех якорях, разнесенных в пространстве, была установлена в Саргассовом море, где внутренние волны очень слабые. Но тогда об этом не знали. О географическом распределении энергии и амплитуд внутренних волн тогда еще не было четких представлений. Ученые из Вудс-хольского института проводили эксперимент в удобном месте на близком

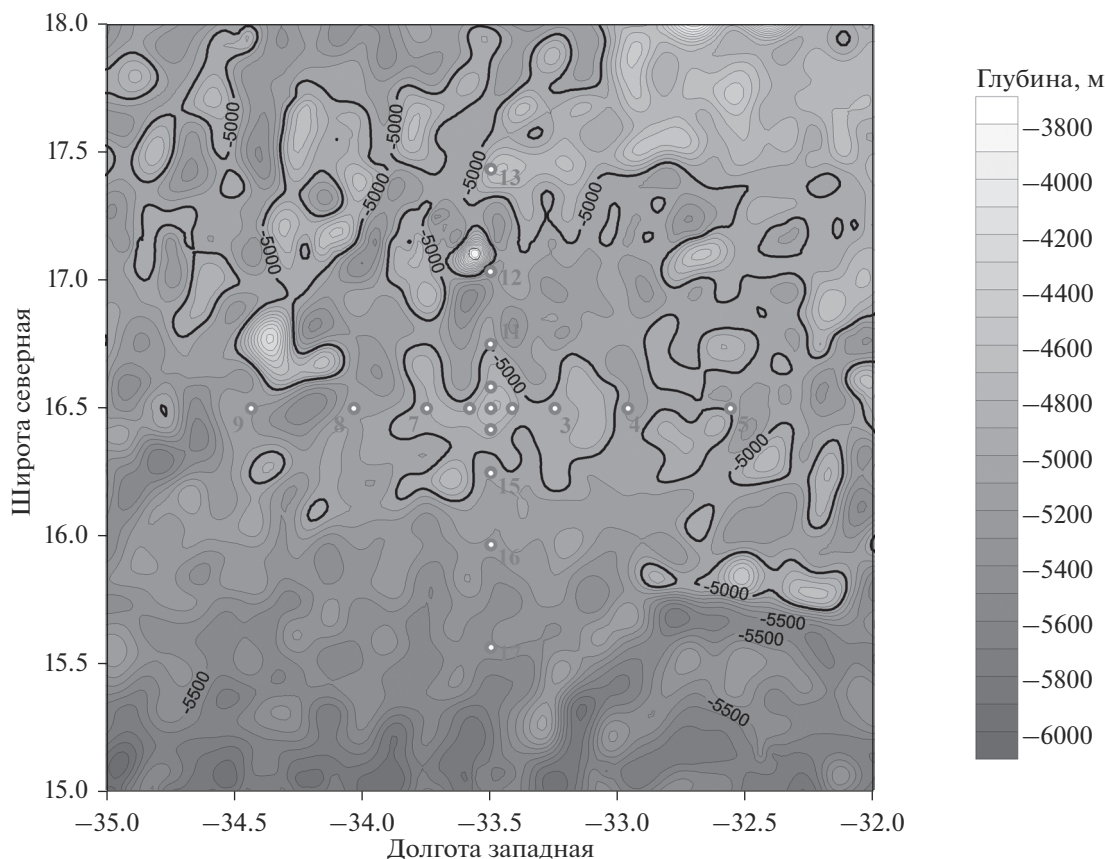


Рис. 1. Карта глубин района Полигон-70 по данным цифрового массива ЕТОРО и схема расположения точек буйковых станций и их номера. Точка 1 в центре полигона.

расстоянии от института. Только в 1975 году появилось два обзора К. Вунша [15, 16] о состоянии знаний о внутренних волнах на тот период времени. Сведения о географическом распределении энергии и амплитуд внутренних волн и районах их генерации появились много позднее [17–20]. В этих работах однозначно показывалась связь энергии внутренних приливов с баротропным приливом и топографией дна.

3. ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПОЛИГОНА-70

Дно в районе полигона-70 оказалось не очень ровным. На дне располагалось много подводных сопок высотой около 500 м над средним уровнем дна. Карта глубин района Полигон-70 по современным данным цифровой батиметрии ЕТОРО показана на рис. 1. Например, около точки 12 приблизительно на широте 17° с.ш. расположена гора с вершиной на глубине 3820 м.

Удаленность полигона от Срединно-Атлантического хребта и континентального склона Африки приводила к тому, что внутренние приливы, генерированные на далеких склонах, затухали,

пройдя большое расстояние до полигона. Зато слабая генерация около небольших подводных гор приводила к резкой неоднородности поля внутренних приливов на полигоне. Это не было понято при анализе данных [21]. Отчасти, это было связано с отсутствием карты рельефа дна полигона. Если буйковая станция находилась около подводной горы, а прибор попадал на характеристическую поверхность, наблюдались умеренно сильные внутренние колебания. Во время анализа данных после Полигона-70 расположению гор не придавалось значения, да и их положение не было хорошо известно. При смене буйковой станции и постановке новой станции в 2 милях от старой, прибор на том же горизонте уже не попадал на характеристическую поверхность, и фиксировались слабые колебания (рис. 2). Следуя [7], наклон характеристической поверхности по оси x можно определить следующей формулой:

$$\frac{k_z}{k_x} = \sqrt{\frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f^2}}, \quad (3)$$

где k_x, k_z – волновые числа по x, z .

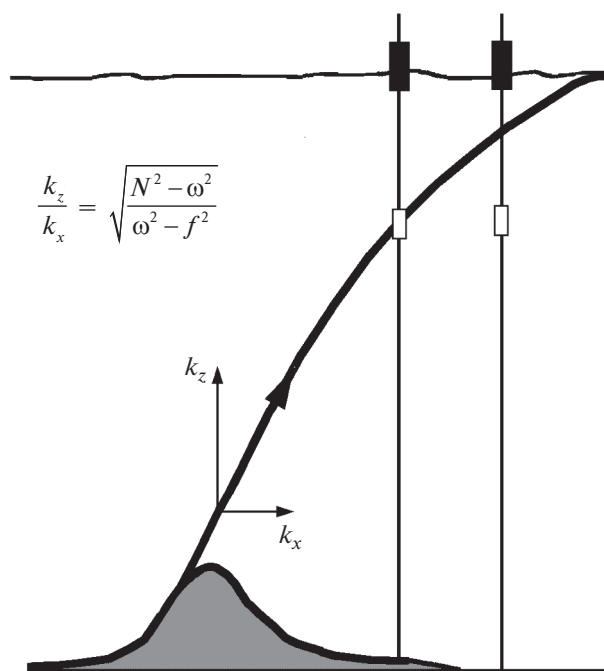


Рис. 2. Схема характеристической кривой (поверхности) для полусуточных внутренних волн около подводной горы и расположение буйев, когда прибор оказывается на характеристической поверхности и когда эта поверхность проходит мимо прибора.

В работе [5] было выведено дисперсионное соотношение:

$$\omega^2 = \frac{N^2 k^2 + f^2 k_z^2}{k^2 + k_z^2} = N^2 \cos^2 \theta + f^2 \sin^2 \theta,$$

или (для простоты) приближенно:

$$\frac{\omega}{N} = \cos \theta, \quad (4)$$

где $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ – волновое число по горизонтали, а θ угол наклона волнового вектора внутренней волны к поверхности. Это означает, что волна распространяется под углом к горизонтали, и этот угол зависит только от стратификации. Это фундаментальное соотношение не было известно ко времени проведения работ на Полигоне-70.

4. НАБЛЮДЕНИЯ НА ПОЛИГОНЕ-70 И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ. СВЯЗЬ С СОВРЕМЕННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Ниже приводится рисунок аналогичный рис. 3 из работы [21]. Это распределение пиков спектральных плотностей полусуточных колебаний температуры. Расчет выполнен заново. Пространственное распределение спектральных плотностей колебаний температур (что соответствует распределению

амплитуд внутренних волн, если температурные колебания пересчитать в вертикальные отклонения, поделив на градиент температуры) не имеет закономерностей, характерных для распространения волн от источника на расстоянии от полигона [22]. Большие амплитуды отмечены в точках 8, 11, 13, 16. Такое распределение сейчас интерпретируется как расположение этих буйев около подводных гор, так что траектория характеристической поверхности проходит через точку прибора. В других точках либо нет гор, либо траектория с интенсивными колебаниями проходит мимо прибора (точки 5 и 9). Здесь полусуточные колебания температуры минимальные, хотя вертикальный градиент температуры не так уж сильно отличается в разных точках, что показала гидрологическая съемка Полигона-70. Сам полигон выбирался из условия, что здесь гидрологические условия должны соответствовать среднему состоянию открытого океана без фронтов. Отличия в спектральных пиках более чем в 10 раз нельзя объяснить такими различными вертикальными градиентами температуры. При анализе этих данных в 1970-х годах такое распределение интерпретировалось как методические ошибки постановки буйев, различные длины и притравки буйрепа и неточный вывод приборов на заданный горизонт, и соответственно, разные вертикальные градиенты температуры.

При смене буйковой станции спектральные функции, рассчитанные по временным рядам температуры до и после смены буйа, зачастую сильно различались. На рис. 4 показаны четыре спектральные функции, рассчитанные по измерениям в точке 5 по ряду измерений длиной 10 сут. Первый ряд с 4 по 13 июня, второй со сдвигом начала 5 сут с 9 по 18 июня, третий со сдвигом начала 10 сут с 19 по 28 июня после смены буйа 19 июня, и четвертый со сдвигом начала 5 сут с 24 июня по 3 июля 1970 г. Видно, что после смены буйа 19 июня форма спектров резко изменилась. Прибор на втором буйе попал на траекторию максимальных внутренних полусуточных возмущений, тогда как прибор на предыдущем буйе находился в слабо-возмущенном поле внутренних полусуточных приливных волн. Ранее такая изменчивость интерпретировалась как различный наклон буйрепа буйа и неточный вывод прибора на заданный горизонт.

В работе [23] приведены оценки когерентности между колебаниями температуры на различных буйах как функция расстояния между буйами. На основе расчетов по большому набору расстояний между буйами и большому количеству пар реализаций делается вывод о случайном распределении оценок когерентности. Теперь, стало понятно, что такой разбор функции когерентности в зависимости от расстояния возможен, только если измерения проводятся непосредственно над районом генерации (почти ровное дно с наличием невысоких подвод-

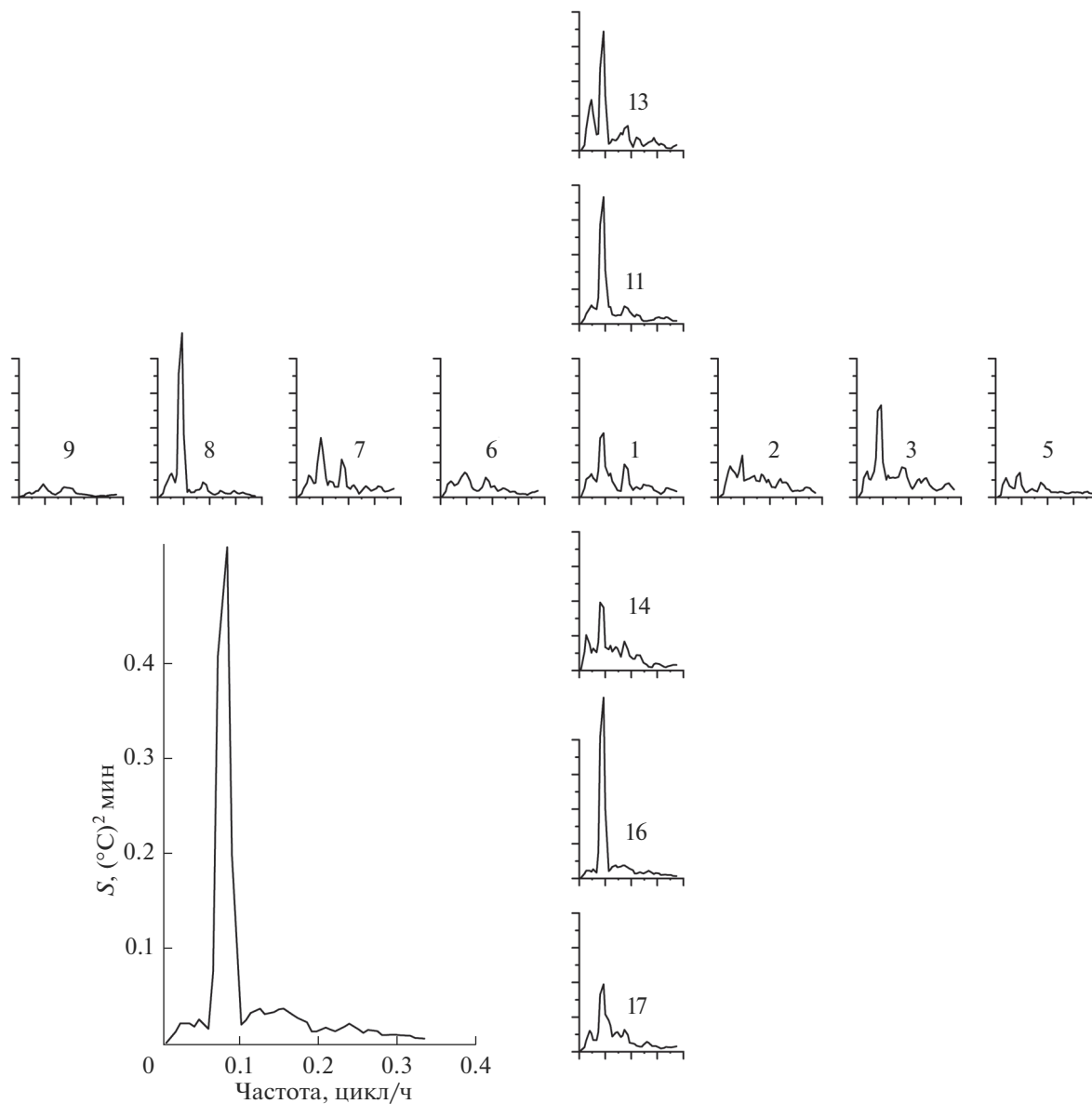


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний температуры в нескольких точках Полигона-70 по измерениям в мае-июне 1970 г. Указаны номера точек измерений. В левой нижней части рисунка повторен спектр для точки 16, где показаны оси со значениями спектральной плотности и частоты, такие же, как и на остальных графиках спектров.

ных гор, где и происходит генерация) и сами возмущения слабые и не могут распространяться на большие расстояния [22]. При этом в районе генерации присутствует несколько мод колебаний, что снижает когерентность.

Рассмотрим взаимодействие внутренних волн и вихрей. Такой анализ проделан в работе [24] по данным Мезополигона-85. В этом эксперимента было установлено 76 буев на расстоянии 10 миль друг от друга, что дало возможность изучить внутреннюю структуру синоптических вихрей и исследовать мезомасштабные вихри верхнего слоя океана, размер которых определяется радиусом

деформации Россби, где в качестве вертикального масштаба используется не глубина океана, а толщина верхнего слоя. Поэтому их размер несколько меньше синоптических вихрей. В работе [24] показано, что на Мезополигоне-85 наблюдается неустойчивая неустановившаяся система внутренних полусуточных приливов, которые взаимодействуют с вихрями. Это взаимодействие несильное, хотя их пространственные масштабы близки (50–100 км), но временные масштабы отличаются больше, чем на порядок (12 часов и месяц). Тем не менее, вихри изменяют среднее состояние океана и стратификацию, и внутренние волны распространяются в неоднородной среде по горизонтали.

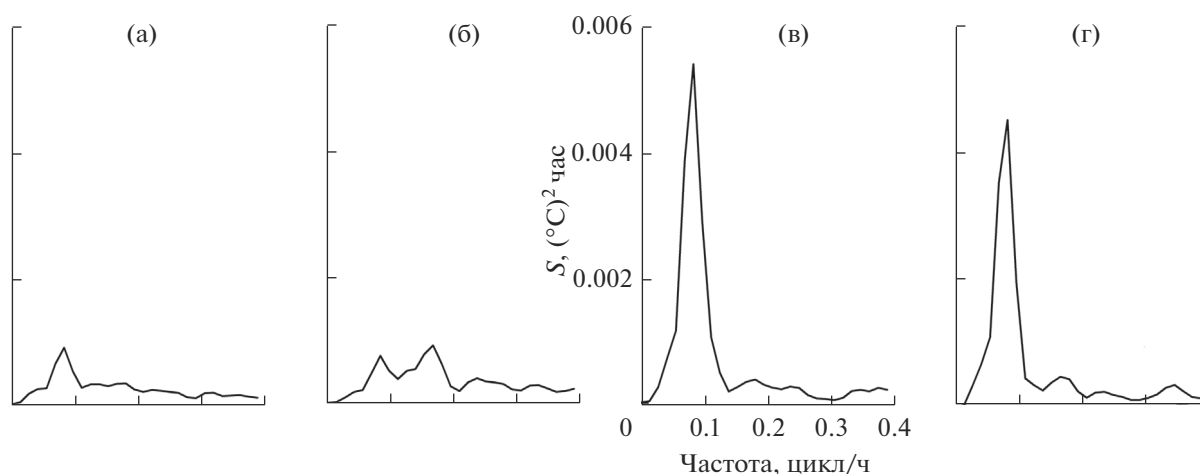


Рис. 4. Последовательные спектры флуктуаций температуры в точке 5 по 10-дневным рядам измерений: (а) 4–13.06.70, (б) 9–18.06.70, (в) 19–28.06.70, (г) 24.06–3.07.70. Пики на частоте волны M_2 (0.0806 цикл/ч). Оси обозначены только на третьем спектре. Смена буя произошла 19 июня 1970 г.

Такое распространение рассмотрено в работе [25]. На границах вихрей формируются фронтальные зоны с высокими горизонтальными градиентами температуры и плотности. Это приводит к отклонению распределения амплитуд внутренних волн от нормального распределения. В районах фронтальных зон увеличивается крутизна волн, усиливаются нелинейные эффекты, увеличивается амплитуда волн и их обрушение.

Интерпретация наблюдений всегда тесно связана с моделями. Открытие синоптических (мезомасштабных, ~ 10 – 100 км) вихрей в океане указывает, что шаг сетки при моделировании динамики океана должен быть ~ 2 – 20 км (от высоких широт к низким), то есть на порядок меньше, чем для атмосферы. Характерный пространственный горизонтальный масштаб внутренних приливов составляет 100 км. При шаге сетки в 10 раз меньше, чем характерный размер (то есть 10 км) мы практически не сможем моделировать какие-либо особенности внутренневолновых процессов. При шаге сетки 1 км такие возможности открываются. Многие нелинейные эффекты и разрушение внутренних волн можно моделировать только с еще меньшим шагом по горизонтали, например, 100 м. Для моделирования эффектов, связанных с перемешиванием нужен еще меньший шаг модели и соответствующие малые вертикальные слои и малые временные шаги [26, 27]. Именно поэтому моделирование мезомасштабного процесса, которым является внутренняя волна, требует значительно меньших шагов по времени, чем моделирование течений и синоптических вихрей. Соответственно требуются большие вычислительные мощности, а развитие моделирования внутренних волн отстает по времени от моделирования крупномасштабных процессов в океане.

Следует отметить сильные изменения в приборной базе. На Полигоне-70 измерения течений проводились механическими самописцами БПВ. Использовались фототермографы для записи температуры на буях, которые и были основными приборами для измерений внутренних волн. Гидрологические съемки выполнялись батометрами и опрокидывающимися термометрами. Точности измерений температуры и солёности были 0.01°C и 0.01‰ . Термосолезонды тех времен АИСТ и ИСТОК имели недостаточное разрешение по современным меркам и плохую устойчивость калибровок. После этого в эксперименте ПОЛИМОДЕ в 1977–1978 гг. стали использоваться электронные самописцы течений ПОТОК и впервые использовали STD-зонды Neil Brown. Весь этот приборный парк теперь заменен на современные STD-зонды с точностью стремящейся к 0.001°C и 0.001 psu. Произошла замена шкал температуры и солёности. В качестве самописцев течений используются акустические измерители ADCP.

После выполнения Полигона-70 [28] измерения в океане стали проводиться на полигонах. Некоторые из них были большой длительности, например, ПОЛИМОДЕ, Мезополигон и Мегаполигон. Измерения стали проводиться до дна и сейчас это стало нормой. Разрезы по 60° с.ш. в Атлантике [29] и через пролив Дрейка [30] выполняются современными приборами, каждая станция берется до дна. Исследуются потоки в глубоководных каналах [31].

5. ВЫВОДЫ

За 50 лет, прошедшие после эксперимента Полигон-70, наши представления об океане измени-

лись. Мы поняли, что существуют вихри открытого океана, и течения в этих вихрях зачастую превышают средние течения. Мы поняли, что внутренневолновые возмущения распространяются вдоль наклонных характеристических поверхностей, а сами волны заполняют всю толщу скачка. Генерация внутренних волн привязана к топографии дна, и основным источником энергии для внутренних волн является прилив. При набегании приливных течений на подводный склон изопикнические поверхности совершают периодические колебания, что и генерирует свободные внутренние приливные волны.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания 0149-2019-0004. Анализ данных поддержан грантом РФФ 16-17-10149. Восстановление данных и расчеты выполнены при поддержке гранта РФФИ 20-08-000246.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л: Гидрометеиздат, 1982, 264 с. (Kamenkovich V.M., Koshlyakov M.N., Monin A.S. Synoptic Eddies in the Ocean // Springer, 1986.)
2. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves // Geophys. Fluid Dyn. 1972. V. 3(3). P. 225–264.
3. Krauss W. Interne Wellen. Berlin–Nikolasee: Gebrüder Borntraeger, 1966. 325 p.
4. Munk W.H. Abyssal recipes // Deep-Sea Res. 1966. V. 13. P. 207–230.
5. Phillips O.M. The Dynamics of the Upper Ocean. 2nd Ed. NY: Cambridge Univ. Press, 1977. 336 p.
6. Wunsch C., Dahlen J. A moored temperature and pressure recorder // Deep-Sea Res. 1974. V. 21. P. 145–154.
7. LeBlond P.H., Mysak L.A. Waves in the Ocean. Amsterdam: Elsevier Oceanographic Series. Elsevier, 1978. 602 p.
8. Torgrimson G.M., Hickey B.M. Barotropic and baroclinic tides over the continental slope and shelf off Oregon // J. Phys. Oceanogr. 1979. V. 9. P. 945–961.
9. Gorodetski A., Ilyashenko Yu. Minimal and strange attractors // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1996. V. 6(6). P. 1177–1183.
10. Dymnikov V., Filatov A. Mathematics of climate modeling. Boston: Birkhäuser, 1997. 260 p.
11. Dymnikov V., Gritsoun A. Climate model attractors: chaos, quasi-regularity and sensitivity to small perturbations of external forcing // Nonlinear Processes in Geophysics. 2001. V. 8. P. 201–209.
12. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л: Гидрометеиздат, 1981. 302 с. (Miropolsky Y.Z. (2001) Dynamics of Internal Gravity Waves in the Ocean. Shishkina O. (ed). Springer)
13. Тареев Б.А. К динамике внутренних гравитационных волн в непрерывно стратифицированном океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 10. С. 1064–1075.
14. Briscoe M.G. Preliminary results from the trimoored internal wave experiment (IWEX) // J. Geophys. Res. 1975. V. 80(27). P. 3872–3884.
15. Wunsch C. Deep ocean internal waves: what do we really know? // J. Geophys. Res. 1975. V. 80(3). P. 339–343.
16. Wunsch C. Internal tides in the ocean // Rev. Geophys. Space Phys. 1975. V. 13(1). P. 167–182.
17. Baines P.G. On internal tide generation models // Deep-Sea Res. 1982. V. 29(3). P. 307–338.
18. Морозов Е.Г. Генерация внутренних приливов на подводных хребтах // Океанологические исследования № 41. 1988. С. 55–67.
19. Морозов Е.Г. Географическая изменчивость внутренних волн // Океанологические исследования № 43. 1990. С. 48–68.
20. Morozov E.G. Semidiurnal internal wave global field // Deep Sea Research. 1995. V. 42(1). P. 135–148.
21. Морозов Е.Г., Плахин Е.А. Некоторые аспекты измерения флуктуаций температуры в океане // Океанологические исследования № 27. 1975. С. 66–71.
22. Morozov E.G. Oceanic Internal Tides. Observations, Analysis and Modeling. A Global View. Dordrecht, Springer. 2018. 316 p.
23. Морозов Е.Г., Филатова Л.П. О горизонтальной когерентности полусуточных колебаний температуры на полигоне-70 // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 3. С. 340–342.
24. Морозов Е.Г., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Частота повторяемости внутренних волн на Мезополлигоне-85 в Атлантике // Океанология. 1998. Т. 38. № 4. С. 521–527.
25. Иванов Ю.А., Морозов Е.Г. Деформация внутренних гравитационных волн потоком с горизонтальным сдвигом скорости // Океанология. 1974. Т. 14. № 3. С. 457–461.
26. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K.S. Baroclinic Tides: Theoretical Modeling and Observational Evidence. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2005. 351 p.
27. Gerkema T., Zimmerman J.T.F. Generation of nonlinear internal tides and solitary waves // J. Phys. Oceanogr. 1995. V. 25(6). P. 1081–1094.
28. Атлантический гидрофизический Полигон-70. Москва. Наука. 1974. 256 с.
29. Фалина А.С., Сарафанов А.А., Гладышев С.В., Соков А.В., Запотьлько В.С., Гладышев В.С. Водообмен между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами: российские экспедиционные исследования в 2011–2013 гг. // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 488–491.
30. Кошляков М.Н., Лисина И.И., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю. Абсолютные геострофические течения в проливе Дрейка по наблюдениям 2003 и 2005 годов // Океанология. 2007. Т. 47. № 4. С. 487–500.
31. Морозов Е.Г., Демидов А.Н., Тараканов Р.Ю. Перенос Антарктических вод в глубоководных каналах Атлантики // Докл. РАН. 2008. Т. 422. № 6. С. 815–818.

Polygon-70: Data Interpretation in the Light of New Concepts on Internal Waves

E. G. Morozov*

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr., 36, Moscow, 117997 Russia

**e-mail: egmorozov@mail.ru*

We analyze our concepts about the ocean dynamics and, in particular, about internal waves. Our concepts changed during the 50 years after the Polygon-70 experiment. We have understood that mesoscale eddies exist in the ocean and currents in these eddies frequently exceed the mean currents. We have understood that internal tides are generated due to the interaction of tidal currents with uneven bottom topography and spread as perturbations of velocity along characteristic surfaces. The waves fill the entire ocean but not confined to the fluctuations of the density pycnocline. Interpretation of the data on internal waves that were published in the 1970s has been revised in the light of our new concepts and knowledge.

Keywords: Polygon-70, internal waves, characteristic equation, bottom topography, generation of internal tides