© Никитин О.П., 2020, Океанологические исследования, 2020, Том 48, № 3, С. 54–75

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).4

ОТ ЭКСПЕРИМЕНТА ПОЛИГОН–70 К ЭКСПЕРИМЕНТУ АБИССАЛЬ

Никитин О.П.

Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6,
e-mail: opnikitin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2020, одобрена к печати 30.10.2020.

В статье обсуждаются вопросы восстановления синоптических полей гидрофизических характеристик по данным измерений, а также схемы расстановки автономных заякоренных буйковых станций в океанских экспериментах Полигон–70, СДЭ ПОЛИМОДЕ и Абиссаль, в которых автор статьи принимал участие. Приводится также ряд важных результатов анализа вертикальной структуры и изменчивости синоптических течений в районах этих экспериментов.

Ключевые слова: океан, синоптические течения, вертикальная структура течений, автономные буйковые станции, расстановка станций, объективный анализ, восстановление полей гидрофизических характеристик, погрешности восстановления

Введение (эксперимент Полигон–70)

Автор настоящей статьи впервые принял участие в дальней океанской экспедиции в 1970 г., будучи студентом МФТИ. Экспедиция на НИС «Академик Курчатов» работала в тропической Атлантике, в районе эксперимента, получившего название Полигон–70. В ходе этой экспедиции осуществлялись подъемы и постановки на новые сроки (перестановки) автономных заякоренных буйковых станций (АБС), поставленных ранее в первой фазе эксперимента Полигон–70, а также был выполнен большой объем гидрологических измерений.

Расстановка 17-ти АБС в виде креста (рис. 1а) на Полигоне–70 с координатами центра 16.5°с.ш., 33.5°з.д. (Корт, Нейман, 1974) была спланирована сотрудником Акустического института АН СССР К.В. Коняевым с целью исследования поля внутренних волн, которыми он активно занимался. В то время информация о вихрях синоптического масштаба в океане у авторов эксперимента отсутствовала. Автор статьи помнит, как летом 1970 г. на научно-техническом совете на НИС «Академик Курчатов» руководители экспедиции выражали крайнее удивление первыми результатами обработки данных, полученных после снятия АБС. Получалось, что в области Северного пассатного течения, текущего на запад, в ограниченном районе Полигона–70, измерениями на системе АБС были зафиксированы течения противоположного направления.

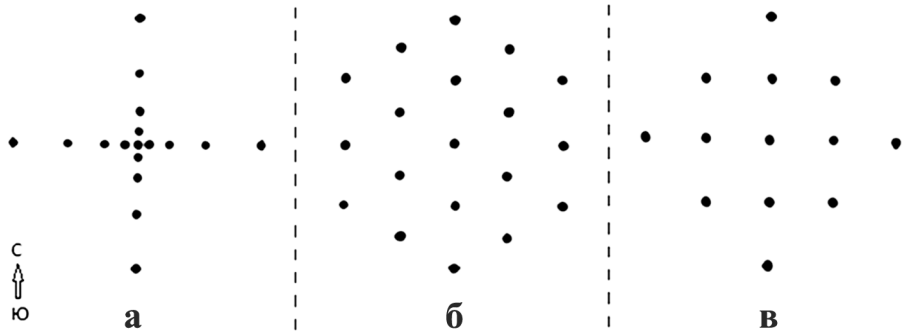

Рис. 1. Расстановка АБС в экспериментах Полигон–70 (**а**), СДЭ ПОЛИМОДЕ (**б**) и Абиссаль (**в**).

Обнаружение океанского вихря синоптического масштаба – главный результат эксперимента Полигон–70 – стало возможным только после трудоемкой обработки, включая низкочастотную фильтрацию всех полученных на 17-ти АБС временных рядов данных измерений за шесть с лишним месяцев, а также построения последовательностей карт векторов скорости синоптических течений на различных глубинах и их анализа сотрудниками Института океанологии АН СССР (Кошляков, Грачев, 1974).

С подобной работой по восстановлению полей синоптических течений по данным измерений в фиксированных точках и построению соответствующих карт автор столкнулся после следующей экспедиции на НИС «Академик Курчатов», в которой принял участие. Эта экспедиция работала в Бермудском треугольнике в 1978 г., в районе синоптико-динамического эксперимента (СДЭ), по советско-американской программе ПОЛИМОДЕ. Долговременные измерения скоростей течений на различных глубинах выполнялись в районе СДЭ на системе из 19-ти АБС, расположенных в сотовом порядке (рис. 1б).

Восстановление синоптического поля скорости на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ

Для восстановления полей синоптических течений по данным измерений скорости на системе из 19-ти АБС СДЭ ПОЛИМОДЕ предлагались различные методы так называемого объективного анализа (сглаживающей интерполяции в узлы заданной регулярной сетки по данным измерений в общем случае нерегулярно расположенных в пространстве точках). Грачев и др. (1978, 1984) использовали известный, разработанный Гандиным (1964), метод оптимальной интерполяции двумерного векторного случайного поля в предположении о его однородности, изотропности и соленоидальности. С помощью этого метода были рассчитаны значения компонент u и v векторов скорости в узлах заданной квадратной сетки и построено 796 карт линий тока синоптических течений для всех четырех горизонтов и всего периода наблюдений на АБС.

Однако полученные в итоге результаты заставили усомниться в применимости метода оптимальной интерполяции для восстановления полей синоптических течений. Как оказалось, наблюденные поля не были однородными, поскольку средняя за годовой период измерений «горизонтальная» удельная кинетическая энергия: $u^2+v^2/2$ (КЭ) синоптических течений существенно (примерно в 2 раза) возрастала от юго-восточной части СДЭ ПОЛИМОДЕ к его северо-западной части (по направлению к Гольфстриму). Поля синоптических течений не были и статистически изотропными, поскольку наблюденные синоптические образования двигались в основном в западном направлении. Кроме того, по полученным непродолжительным годовым рядам измерений, эти характеристики могли быть рассчитаны только весьма приближенно. Действительно, характерный временный масштаб энергонесущих синоптических образований, по данным расчетов спектров течений в районе СДЭ ПОЛИМОДЕ, составил 73 суток (Бышев, 2003), и поэтому за год измерений было зафиксировано лишь считанное число независимых синоптических реализаций, что крайне мало. В метеорологии, где метод Гандина широко использовался, недостатка в данных наблюдений не было.

По указанным причинам интерполяцию на основе метода Гандина для восстановления полей синоптических течений в районе СДЭ ПОЛИМОДЕ нельзя было признать оптимальной. Поэтому автор (Никитин, 1980а), затем Ямпольский (1982), Резник и Виноградова (1983), а впоследствии и Пантелеев (1990) предложили альтернативные методы объективного анализа данных измерений скорости течений. При этом Пантелеев провел сравнение разработанного им вариационного метода с методом оптимальной интерполяции и показал, что последний метод пересглаживает поля скорости течений.

АБС на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ располагались в узлах регулярной сетки с шагом 72.2 км. Такой шаг следует признать слишком большим. На картах динамической топографии (Burkov, Polyakova, 1986), построенных для района СДЭ ПОЛИМОДЕ по данным гидрологических съемок, которые имели меньший шаг между станциями, чем шаг между АБС, видны вихри с размерами около 100 км, которые отсутствуют на соответствующих картах, построенных Грачевым и др. (1984) по данным АБС.

Автор предложил для восстановления синоптического поля скорости на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ использовать кусочную полиномиальную среднеквадратичную аппроксимацию (Никитин, 1980а). В случае редкой сети станций нерационально осуществлять восстановление полей компонент скорости независимо друг от друга с тем, чтобы потом по данным о компонентах строить последовательности карт векторов скорости течений на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ, как это было для Полигона–70. Поэтому имело смысл принять предположение о горизонтальной бездивергентности (соленоидальности) синоптического поля скорости, что позволяло несколько обогатить аппроксимацию одной составляющей вектора скорости за счет данных о другой составляющей, ввести функцию тока и восстанавливать ее, а не компоненты скорости по отдельности. Подробно процедура

восстановления изложена в работе (Никитин, 1980а). Там же приведены примеры восстановления тестовых (заданных формулами) полей функции тока ψ. Тестирование показало, что точность восстановления существенно зависит от соотношения пространственного масштаба M_ψ тестового поля ψ (половина расстояния между центрами соседних вихрей) и шага h сети АБС. При $M_\psi > h$ карты, построенные по данным объективного анализа, визуально неплохо соответствовали картам исходных тестовых полей, а при $M_\psi > 2h$ были практически полностью идентичны. В предельном случае $M_\psi = h$, когда восстановление тестовых полей визуально еще можно было признать удовлетворительным, экстремумы тестовых полей при восстановлении систематически оказывались существенно заниженными по абсолютной величине. Достоинство предложенного метода в том, что он не требует априорного знания статистической структуры восстанавливаемого поля и его можно использовать с необходимыми изменениями и для других, не обязательно продолжительных гидрофизических полигонов с регулярным расположением АБС. Впоследствии данный метод был применен для восстановления поля функции тока по данным буйкового полигона в районе эксперимента Абиссаль (Никитин, Первухина, 1989).

Восстановление синоптического поля гидрофизической характеристики по данным измерений в нерегулярно расположенных в пространстве точках

При разработке описанного в предыдущем разделе метода существенно использовался факт регулярности расстановки АБС на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ. Однако при работе автора с данными площадных съемок обрывными зондами ХВТ (Никитин, 1984а), где точки измерений зачастую оказывались нерегулярно расположенными в пространстве, возникла необходимость в разработке другого, более сложного метода объективного анализа. Помимо регулярности восстановление поля синоптической компоненты скорости по данным полигона АБС проще, чем восстановление синоптического поля температуры по данным единичной съемки ХВТ потому, что основная фильтрация шума в данных АБС происходит путем предварительной низкочастотной фильтрации полученных временных рядов измерений (температуры или компонент скорости).

В методе оптимальной интерполяции восстанавливаемые поля рассматриваются как реализации случайной функции координат и времени. Автором был выбран иной подход, при котором искомое поле синоптической составляющей измеряемой гидрофизической характеристики (температуры, компонент скорости и т.п.) предполагается сравнительно гладким в пространстве и устойчивым в течение некоторого промежутка времени. Это поле сигнала можно представить детерминированной функцией от координат и времени. Неоднородности, создаваемые внутренними волнами, мелкомасштабной турбулентностью, а также случайные ошибки измерений при этом полагаются совокупно случайной функцией – шумом, наложенным на искомое поле сигнала. Такой подход не требует знания статисти-

ческих характеристик искомого восстанавливаемого поля (пространственных корреляционных функций, средних значений, отношения шум/сигнал), однако шум в точках измерений предполагается некоррелированным и его уровень (дисперсия) желательно известным.

На основе такого подхода в работе (Никитин, 1982) был предложен метод восстановления синоптической составляющей поля скалярной гидрофизической величины по зашумленным данным единичных измерений, произведенных в общем случае в нерегулярно расположенных в пространстве точках, например, по данным единичной съемки зондами ХВТ. Согласно этому методу, искомое поле последовательно аппроксимируется в области измерений сглаживающими поверхностями все более сложного вида, начиная с горизонтальной плоскости, осредняющей данные измерений, вплоть до интерполирующей поверхности. Каждая сглаживающая поверхность представляет собой линейную комбинацию ортонормированных на системе точек измерений базисных функций от горизонтальных координат, коэффициенты которой находятся методом наименьших квадратов по данным измерений. Базисные функции строятся процессом ортогонализации Грама–Шмидта по заданному набору линейно независимых функций (например, алгебраических одночленов) на рассматриваемой совокупности произвольно расположенных в пространстве несовпадающих точек измерений. Предположение о гладкости в пространстве искомого поля исключает применение метода в области с резким фронтальным разделом.

Указанный процесс пошаговой регрессии останавливается и полагается, что вид аппроксимирующей поверхности определен правильно, когда дисперсия отклонений данных измерений от аппроксимирующей поверхности становится примерно равной заданной, заранее рассчитанной дисперсии шума. Автором были выведены также два условия выделения оптимальной поверхности, не требующие знания уровня шума, однако надежнее, во избежание вероятного пересглаживания данных (особенно при автоматизированной обработке), все-таки пользоваться заданной дисперсией шума. Ее практически можно оценить по данным многоразовых измерений в фиксированной точке гидрологической съемки (многосуточных гидрологических станций) и попарных зондирований (Никитин, 1980б), а для скорости течений по данным близкорасположенных АБС (Никитин, 1981). Поскольку при изучении синоптических процессов к короткопериодным, подлежащим удалению, процессам относятся колебания с периодами, меньшими периода синоптического минимума на временном спектре восстанавливаемой характеристики, то продолжительность многосуточной станции должна составлять не менее периода этого минимума, близкого обычно к удвоенному периоду инерционных колебаний. Дискретность измерений по времени на такой станции должна позволять разрешать все колебания, соответствующие наибольшим пикам в короткопериодной части временного спектра.

В результате описанного подбора оптимальной сглаживающей поверхности получается аналитическое выражение, в котором вся информация о поле

сигнала содержится в рассчитанных коэффициентах. С помощью этого выражения можно производить интерполяцию сглаженных значений в узлы любой заданной расчетной сетки. Возможность представления искомого поля синоптической составляющей аналитическим выражением, а не только набором чисел в узлах заданной сетки, как в методе оптимальной интерполяции, следует отнести к достоинствам описываемого метода. Такое представление удобно при операциях дифференцирования и интегрирования.

В работе (Никитин, Элькен, 1982) представлены результаты численных экспериментов с восстановлением исходных детерминированных полей сигнала по заданным в узлах квадратной безразмерной сетки 5×5 (моделирующей реальную гидрологическую съемку) зашумленным данным. Поля сигнала задавались аналитическими выражениями, моделирующими различные синоптические ситуации. В процессе численных экспериментов на эти исходные поля накладывался белый шум различной интенсивности. Далее применялся метод последовательных аппроксимаций поля сигнала линейными комбинациями ортонормированных на системе точек измерений базисных функций от горизонтальных координат. Сравнение восстановленных полей с исходными показало, что данный метод, эффективно убирая шум, довольно успешно позволяет восстановить все существенные особенности исходных модельных (тестовых) полей при реальных значениях отношения шум/сигнал и при условии, что шаг сетки меньше характерного пространственного масштаба сигнала (синоптических образований) не менее, чем в полтора раза.

На рис. 2 изображены результаты эксперимента для квадратной сетки 5×5, где значения модельного зашумленного поля заданы только в 13 точках из 25. Как видно, рассмотренный метод довольно успешно позволяет восстановить по одному набору «зашумленных» данных искомое поле детерминированной составляющей. В работе (Nikitin, Vinogradova, 1980) описано применение этого метода для восстановления синоптического поля температуры по данным съемок ХВТ, а в Атласе ПОЛИМОДЕ (Nikitin, Vinogradova, 1986) приведены 108 карт температуры, построенные для различных глубин с применением описанного метода по данным 27 площадных съемок зондами ХВТ района СДЭ ПОЛИМОДЕ.

а **б** **в**

Рис. 2. Исходное модельное (**а**), зашумленное (**б**) и восстановленное (**в**) поле сигнала.

Оптимизация размещения точек океанографических измерений

Измерения на океанографических полигонах производятся по заранее спланированной схеме размещения станций. В зависимости от поставленных задач, одна и та же схема может оказаться рациональной или неприемлемой. Например, для расчета зональной составляющей скорости течения по данным о поле плотности с использованием динамического метода рациональным будет размещение гидрологических станций вдоль меридиана. Однако такое размещение окажется неприемлемым, если потребуется рассчитать меридиональную составляющую течения. Поэтому, приступая к планированию размещения станций на полигоне, нужно иметь четкое представление о том, что и каким образом будет рассчитываться по данным этих станций. Оптимальной расстановкой станций можно назвать такую, при которой погрешность восстановления искомой гидрофизической характеристики оказывается минимальной. Если по данным станций оценивается несколько характеристик, то оптимальной расстановкой станций будет такая, при которой достигается приемлемый компромисс между величинами погрешностей восстановления всех рассматриваемых характеристик.

Вопрос о расположении точек измерений при восстановлении двумерных метеорологических полей и полей их дифференциальных характеристик рассматривался в рамках метода оптимальной интерполяции (Гандин, Каган, 1976). Для применения этого метода необходимо знать корреляционную функцию исследуемого поля в рассматриваемом районе, практически рассчитать которую для океана можно зачастую только весьма приближенно, вследствие малого объема данных и возможной нестационарности, неоднородности и неизотропности исследуемых полей. Например, Harrison и Heinmiller (1983) отказались от использования метода оптимальной интерполяции для восстановления поля температуры в хорошо изученном районе Саргассова моря после неудачных попыток расчета пространственных корреляционных функций. И если для построения самого исследуемого поля неоднозначность в определении корреляционной функции, по-видимому, не имеет большого значения (Нежиховский, 1981), она решающим образом влияет на точность восстановления дифференциальных характеристик, расчет которой к тому же весьма сложен (Гандин, Каган, 1976).

Изложенный в предыдущем разделе метод восстановления (аппроксимации) синоптической компоненты поля измеряемой величины был разработан для произвольного расположения точек измерений в пространстве. Однако для неблагоприятных конфигураций точек измерений точность восстановления оказывается очень низкой. Задача расчета погрешностей восстановления полей измеряемой величины и ее производных в зависимости от расположения точек измерений была подробно рассмотрена в работах (Никитин, 1984б; Никитин, Элькен, 1986). Были выведены формулы, с помощью которых для заданной конфигурации точек измерений и степени сглаживания данных можно оценивать точность восстановления поля, как самой измеряемой величины, так и ее линейных дифференциальных характеристик.

Были предложены критерии, согласно которым все конфигурации точек измерений делятся на благоприятные, неблагоприятные и неприемлемые с точки зрения восстановления на них полей той или иной характеристики измеряемой величины рассматриваемым методом аппроксимации ортогональными на системе точек измерений функциями.

В работе (Никитин, Элькен, 1984) было проведено тестирование многих различных конфигураций путем расчетов по выведенным формулам. Эти формулы важно применять на этапе планирования размещения точек океанографических измерений, а не на этапе обработки данных. К сожалению, рассмотренная теория не дает (как и теория оптимальной интерполяции) процедуры расчета оптимальной конфигурации для заданного набора точек измерений. Однако путем расчета погрешностей по полученным формулам можно количественно установить, насколько точно на каждой заданной конфигурации восстанавливаются поля измеряемой величины и ее дифференциальных характеристик. Производя расчеты по оптимизации размещения точек измерений для различных вариантов их расположения, можно заранее до проведения измерений подобрать наиболее благоприятный вариант для решения поставленных задач обработки данных.

Представляло интерес установить, насколько хорошо с точки зрения рассмотренного метода были расставлены АБС во время проведения экспериментов Полигон–70 и СДЭ ПОЛИМОДЕ, в которых автор принимал участие.

Расчеты по формулам показали, что крестовидная конфигурация АБС на Полигоне–70 (рис. 1а) является крайне неудачной для картирования синоптических течений в области измерений. Такая конфигурация (антенна) может приводить к существенному искажению восстанавливаемой картины синоптических течений. Достаточно указать на то, что «гиперболические» слагаемые наблюдаемого поля, которое можно представить в области измерений разложением в ряд Тейлора по алгебраическим одночленам, на крестовидной конфигурации восстановлены быть не могут. Например, если искомое поле компоненты вектора скорости $u(x,y,t)$ в области измерений имеет вид «седла»: $u(x,y,t)=a(x+b)(y+c)$, где коэффициенты a, b и c зависят от времени t, то оно воспринимается рассматриваемой антенной в виде плоского поля $u'(x,y,t)=a'x+b'y+c'$. При этом, в частности, «седло» вида $u(x,y,t)=axy$ вообще оказывается невидимым. Следует заметить, что при обработке данных измерений скорости течений на системе АБС Полигона–70 поле скорости в области измерений не восстанавливалось и в работе (Кошляков, Грачев, 1974) приведены только векторы скорости в точках измерений.

Система из 19-ти АБС (рис. 1б) оказалась в общем благоприятной с точки зрения восстановления на ней полей температуры, компонент или модуля скорости по данным, полученным в точках постановок АБС. Согласно расчетам, дисперсия оценки восстановленного значения сигнала (синоптического поля) в любой точке внутри области измерений получалась меньше дисперсии шума. Это означало, что величина сигнала, вычисленная по данным станций системы

с помощью метода аппроксимации ортогональными функциями в любой точке внутри области измерений (в том числе и в точках постановок станций), оказывалась более точной, чем величина, которую можно было бы получить при наличии шума в результате непосредственного единичного измерения в этой точке.

В то же время расчеты показали, что изображенная на рис. 1б конфигурация точек измерений не является удачной с точки зрения восстановления на ней производных, необходимых для более тонких задач обработки данных, например, экспериментальных оценок динамических балансов в поле синоптической составляющей поля скорости течения. Суть в том, что неравноправное размещение по x и по y точек измерений рассматриваемой системы из 19 АБС приводит к неравноточному восстановлению производных по x и по y в точках расчетной сетки. Поэтому вызывает сомнение результат, полученный Ямпольским (1982), который по данным измерений на системе АБС СДЭ ПОЛИМОДЕ осуществил проверку предположения о горизонтальной бездивергентности ($du/dx+dv/dy=0$) применяемого при восстановлении функции тока синоптической (низкочастотной) составляющей поля скорости. Для проверки Ямпольский использовал привязанную к конфигурации точек полигона АБС СДЭ ПОЛИМОДЕ прямоугольную сетку с шагами h по y и $\sqrt{3}/2h$ по x. Уже вследствие этого конечно-разностные оценки производных по y следует ожидать систематически более низкими, чем оценки по x. Из-за неравноправия по x и y исходной системы точек измерений, Ямпольский был вынужден использовать неравноправную по x и y аппроксимацию исследуемых полей полиномами Чебышева третьего порядка по x и второго по y, с помощью которой производилась интерполяция в узлы упомянутой прямоугольной сетки. В результате такого подхода, из-за значительно более сильного сглаживания по y, средняя по всем узлам расчетной сетки величина dv/dy оказалась существенно меньше по модулю, чем средняя величина du/dx. Ясно, что вопреки выводу Ямпольского, этот результат не может служить убедительным экспериментальным доказательством невыполнения условия горизонтальной бездивергентности для низкочастотной составляющей скорости течения.

Согласно рассчитанным погрешностям восстановления полей измеряемой величины и ее производных, изображенная на рис. 1в конфигурация системы из 13 АБС свободна от описанных недостатков расстановок АБС на Полигоне–70 и полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ. Система АБС (полигон) с такой конфигурацией, предложенной автором, была поставлена в 1986 г. в период эксперимента Абиссаль в тропической зоне Тихого океана (Никитин, Первухина, 1989). Расстояние между ближайшими АБС составляло 10 миль. Рядом с центральной АБС была поставлена дополнительная 14-я АБС с целью оценки распределения с глубиной дисперсии шума. Пример восстановления искомого поля сигнала на такой системе точек измерений (повернутой для удобства машинного рисования изолиний на 45°) показан на рис. 2.

Эксперимент Абиссаль

Эксперимент Абиссаль выполнялся в 1984–1990 гг. по одноименному проекту (1983–1995 гг.) в северо-восточной части тропической зоны Тихого океана в связи с предполагавшейся добычей полиметаллических руд с океанского дна. Автор принимал активное участие в планировании экспедиций и в обработке полученных экспериментальных данных (Никитин, 1991, 1995, 1996). В указанный период в район эксперимента было организовано 16 рейсов научно-исследовательских судов, в ходе которых проводились комплексные океанографические исследования. В частности, в рейсах на срок до четырех недель выставлялись кластеры из 2–7 АБС для измерения скоростей региональных течений.

В 1986 г. в ходе двухсудовой экспедиции был выставлен полигон АБС (рис. 1в). Основной (прикладной) целью было получение инструментальных данных о величинах скоростей и о картинах течений на разных глубинах непосредственно в районе предполагавшейся работы добычного комплекса – районе с глубинами около 5000 м. Вторичной (научной) целью постановки полигона была запланированная экспериментальная проверка выполнимости уравнения сохранения квазигеострофического потенциального вихря. Этой второй целью и объясняется количество (13) и вид расстановки АБС в системе (рис. 1в), которая была спланирована автором на основе собственных теоретических разработок (Никитин, 1984б; Никитин, Элькен, 1984, 1986).

В общей сложности в период 1984–1989 гг. в районе было выставлено 59 АБС. Измерения проводились почти во все месяцы года (кроме сентября и декабря), главным образом в районе с координатами 13.5–14.5°с.ш., 131–132.5°з.д. Измерители течений устанавливались как в верхних, так и в нижних слоях океана. В непосредственной близости от дна измерения скорости течений проводились на двух – четырех горизонтах с помощью придонных АБС, самовсплывающих по подаваемому акустическому сигнал (Балакин и др., 1991). Были выполнены четыре успешные постановки таких станций на срок до двух месяцев. Для отслеживания течений в поверхностном слое океана применялись свободно-дрейфующие поплавки с заглубленным на заданную глубину парусом и с пассивными, а также активными радиолокационными ответчиками. Данные о реальных распределениях скорости течений по всей толще океана были нужны для расчета динамических нагрузок на пятикилометровый трубопровод добычного комплекса. Поскольку измерения течений и других параметров водной среды в заданном районе охватывали всю толщу вод, проект Абиссаль следовало бы назвать не проект Абиссаль, а проект Вертикаль.

В качестве регистрирующего прибора на АБС использовался автономный цифровой измеритель (самописец) течений и температуры АЦИТТ, выпускавшийся серийно на рижском заводе гидрометеоприборов. На практике он показал себя далеко не с лучшей стороны. Из-за конструктивных дефектов и недостаточно высокого качества изготовления, проводимые измерения скоростей течений и температуры воды постоянно сопровождались разного рода погрешностями, в том числе

грубыми и систематическими. Потребовались значительные усилия по контролю и редактированию массива данных измерений, полученного за период 1984–1989 гг. (Никитин, Первухина, 1991; Никитин и др., 1995), в результате чего почти одна треть записей скорости течений была забракована. В итоге было получено 312 записей измерений скорости течений на 20-ти горизонтах – от приповерхностного (50 м) до придонного (~ 5000 м).

Из-за значительных потерь данных наблюдений (хотя измерители в ключевых точках были задублированы), а также из-за того, что фактическая расстановка АБС на полигоне 1986 г. отличалась от плановой, от проверки выполнимости уравнения сохранения потенциального вихря пришлось отказаться. Вместо этого была выполнена проверка выполнимости геострофических соотношений для низкочастотных течений в тропиках (Лежнев, Никитин, 1989). Геострофические сдвиги скорости по вертикали были рассчитаны не по данным гидрологических зондирований в окрестности АБС, а по фильтрованным записям температуры теми же измерителями АЦИТТ, что и записи скорости течений. Эти расчеты были основаны на тесной связи между температурой и соленостью в слое 300–1000 м, установленной для района исследований. Сравнение показало, что вертикальные сдвиги скорости измеренных течений (после их низкочастотной фильтрации) находились в согласии с геострофическими сдвигами в рамках оцененных погрешностей.

Особенности вертикальной структуры и изменчивости низкочастотных течений в районах экспериментов Абиссаль, Полигон–70 и др.

В публикациях автора (Никитин, 1997, 1998, 1999) приведены обобщенные результаты анализа особенностей вертикальной структуры и изменчивости низкочастотных (ниже инерционной частоты) океанских течений в районе эксперимента Абиссаль с привлечением данных и результатов экспериментов Полигон–70 и СДЭ ПОЛИМОДЕ, а также американских экспериментов DOMES, Nares-1, ЛДЭ и Кластер С ПОЛИМОДЕ.

Было предложено разделение океанской толщи в районах указанных экспериментов на три слоя: верхний слой (включающий однородный слой и слой сезонного пикноклина), занимаемый мелководными меандрирующими струями крупномасштабных течений и приповерхностными мезомасштабными возмущениями; промежуточный слой (включающий слой главного пикноклина), который отличает присутствие в нем бароклинных синоптических возмущений, в том числе синоптических вихрей, затухающих с глубиной, а также струй подповерхностных течений и противотечений, предположительно порождаемых вихрями; и нижний слой, простирающийся до дна, в котором низкочастотные колебания скорости вызываются баротропными возмущениями, а также волновыми возмущениями, индуцированными, по-видимому, вышерасположенными синоптическими вихрями. Эти возмущения, взаимодействуя с рельефом дна и отражаясь от него, обусловливают наблюдаемое во многих районах Мирового океана увеличение КЭ низкочастотных

течений по направлению к дну. Различный характер гидродинамических процессов обусловливает различный характер низкочастотных колебаний скорости течений в выделенных слоях и оправдывает представление вертикальной структуры поля скорости региональных низкочастотных течений в виде трех слоев. По данным одновременных измерений на соседних АБС было также установлено, что низкочастотные течения, как в верхнем, так и в нижнем слоях, имели невысокую горизонтальную корреляцию. Этим они отличались от течений в промежуточном слое, где радиус корреляции (характерный горизонтальный масштаб) был существенно больше.

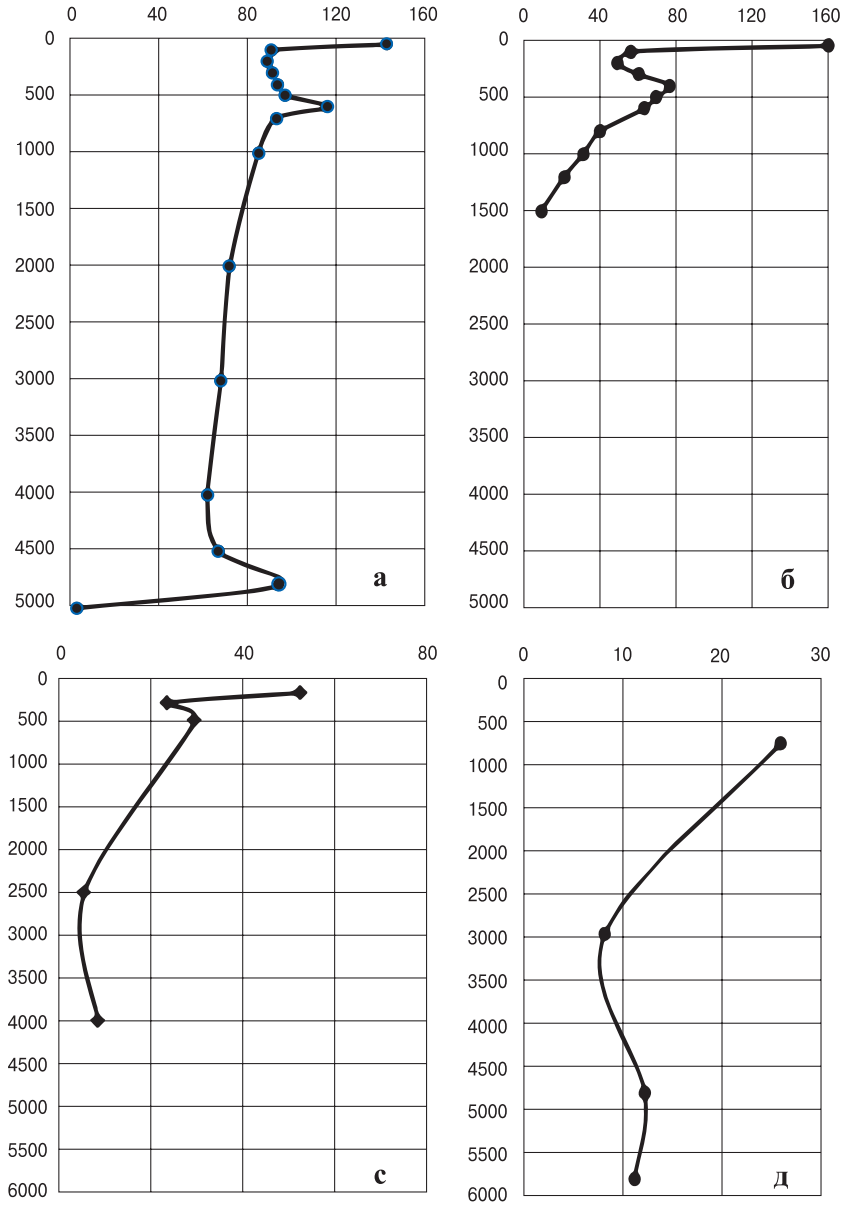

Рис. 3. Распределение с глубиной (оси ординат, м) средней по периоду и району измерений КЭ низкочастотных течений (оси абсцисс, см^2/с^2), рассчитанной по данным экспериментов Абиссаль (**а**), Полигон–70 (**б**), Кластер С ПОЛИМОДЕ (**с**) и Nares-1 (**д**).

Расчет по данным всех измерений скорости течений на АБС в районе эксперимента Абиссаль показал, что осредненный (по времени и по всем АБС) вертикальный профиль КЭ региональных низкочастотных течений имеет шесть экстремумов: поверхностный максимум, подповерхностный минимум (200 м), промежуточный максимум (600 м), глубинный минимум (4000 м), придонный максимум (4800 м) и донный минимум (рис 3а). При этом поверхностный, промежуточный и придонный максимумы КЭ соответствуют выделенным трем слоям.

Построенный автором для района эксперимента Полигон–70 в тропической Атлантике осредненный по 17 АБС и за 6.5 месяцев измерений вертикальный профиль КЭ также демонстрирует поверхностный (25 м) максимум, подповерхностный (200 м) минимум и промежуточный (400 м) максимум (рис. 3б).

Измерения скоростей течений на системе 17 АБС Полигона–70 ниже горизонта 1500 м не выполнялись. Поэтому автор произвел аналогичные расчеты КЭ по данным годичных измерений скоростей течений на кластере С буйковой системы III ПОЛИМОДЕ (рис. 3с), а также по трехгодичным данным эксперимента Nares-1 (рис. 3д). Оба эксперимента проводились в западной части тропической Атлантики в окрестностях точек с координатами 16°с.ш., 54°з.д. и 23°с.ш., 64°з.д. соответственно. Помимо подповерхностного минимума и промежуточного максимума на рис. 3с проявился глубинный минимум, а на рис. 3д – придонный максимум и донный минимум.

К сожалению, данные других доступных многомесячных измерений скорости течений, выполненных с использованием АБС в различных точках Мирового океана, характеризуются, как и в случае эксперимента Nares-1, низкой дискретностью по вертикали (как правило, менее 5 горизонтов) и отсутствием данных о верхнем слое, поскольку при измерениях в большинстве случаев использовались притопленные АБС. На основании таких измерений трудно судить о вертикальных профилях КЭ даже ниже верхнего слоя, поскольку из-за низкой дискретности измерений по вертикали реально существовавшие экстремумы КЭ могли быть в этих измерениях пропущены.

На полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ измерения выполнялись всего на четырех горизонтах. Однако согласно данным, приведенным в статье (Кошляков и др., 1980), средняя по всем 19 АБС и за весь период измерений КЭ на горизонтах 100, 400, 700 и 1400 м на полигоне СДЭ ПОЛИМОДЕ составляла соответственно 265, 294, 175 и 84 $см^2/с^2$. То есть, в районе СДЭ вблизи горизонта 400 м был зафиксирован промежуточный максимум КЭ низкочастотных течений (см. также статью (Бышев, Корт, Нейман, 1981) и обсуждение в статье (Никитин, 1999)).

Таким образом, можно сделать заключение о том, что установленные по данным эксперимента Абиссаль особенности осредненного вертикального профиля КЭ низкочастотных течений в северо-восточной части тропической зоны Тихого океана не являются спецификой полученного массива данных или чисто региональным эффектом, а характерны также и для ряда других областей Мирового океана.

Автором была также рассмотрена сезонная изменчивость интенсивности низкочастотных течений в районах экспериментов Абиссаль и DOMES в Тихом океане, а затем и в районах экспериментов СДЭ ПОЛИМОДЕ и Полигон–70 в Атлантическом океане (Никитин, 1998). Было показано, что годовой ход КЭ (интенсивности) низкочастотных течений в выделенных для этих районов трех слоях (верхний, промежуточный и нижний) различен и в разных слоях внутригодовые максимумы КЭ наблюдаются в разное время. Сезоны усиления крупномасштабных течений в этих районах сопровождаются усилением неравномерности вертикального распределения КЭ низкочастотных течений, их бароклинизацией. Сезонам ослабления крупномасштабных течений соответствуют периоды баротропизации, в которые вертикальное распределение КЭ по всей толще океана наиболее равномерно. Переход от периода бароклинизации к периоду баротропизации связан с перераспределением энергии между указанными выше слоями и сопровождается перемещением от слоя к слою с задержкой в 2–3 месяца уединенного возмущения в поле КЭ. Это возмущение, проникая в глубинные слои океана, повышает там уровни КЭ низкочастотных течений. Им можно объяснить существование сравнительно сильных течений на больших глубинах. Благодаря ему сезонные изменения КЭ низкочастотных течений в верхнем и нижнем слоях океана могут происходить в противофазе. Рис. 4 иллюстрирует перечисленные выводы для района Полигона–70.

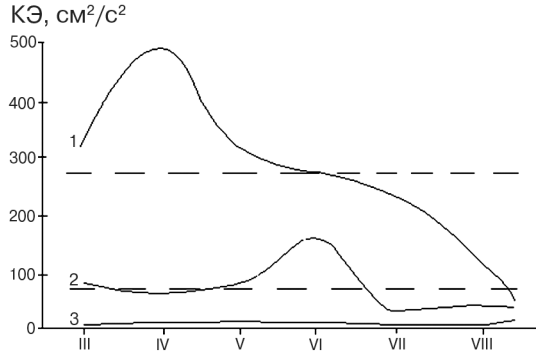

Рис. 4. Ход во времени усредненной по 17 АБС Полигона–70 и помесячно КЭ низкочастотных течений на глубинах 25 (1), 400 (2) и 1500 (3) м. Штриховыми линиями указаны средние за период измерений уровни КЭ на глубинах 25 и 400 м.

Заключение

Географическое положение эксперимента Абиссаль в Тихом океане было схожим с географическим положением эксперимента Полигон–70 в Атлантическом океане. Оба эксперимента выполнялись в северных тропиках, на южных периферия Северных пассатных течений (Тихого и Атлантического океанов) в их восточных частях, в районах с глубинами около 5000 м и с высоким положением скачка плотности. Поэтому в результатах обработки данных измерений на АБС, полученных в обоих экспериментах, прослеживается много общего. Были похожи частотные

спектры КЭ и, в частности, положение синоптического минимума, в соответствии с которым осуществлялась низкочастотная фильтрация измеренных компонент *u* и *v* вектора скорости течений. В районе эксперимента Абиссаль, как и в районе эксперимента Полигон–70, течения в верхнем слое до глубины ~ 100 м значительно отличались по направлению и характеру изменения во времени от течений в слое главного пикноклина. В последнем по данным 16-ти среднемасштабных гидрологических съемок, выполненных в 1984–1989 гг., доминировали течения синоптического масштаба, вихри с размерами до 450 км, как циклонического, так и антициклонического знака вращения.

В экспедиции 1986 г. в районе эксперимента Абиссаль в слое 200–1000 м был зафиксирован циклонический вихрь с размерами 150–200 км, перемещавшийся в западо-юго-западном направлении вслед за антициклоническим вихрем со скоростью примерно 5 км/сут (Никитин, Первухина, 1989). По данным АБС орбитальные скорости в вихре составляли (после низкочастотной фильтрации) до 30 см/с и ось вихря по отношению к вертикали была наклонена. За исключением знака вращения эти параметры вихря были очень похожи на параметры главного антициклонического вихря, обнаруженного в эксперименте Полигон–70 (Кошляков, Грачев, 1974).

Как уже отмечалось выше, в слое 0–1500 м основные морфологические особенности осредненного (по времени и по всем АБС) вертикального профиля КЭ (или модуля скорости) региональных низкочастотных течений в районах экспериментов Абиссаль и Полигон–70 совпадают. Это наличие поверхностного максимума, подповерхностного минимума и промежуточного максимума.

Кошляков (1987) связал существование промежуточного максимума скорости на горизонте 400 м в районе Полигона–70 с генерацией возмущений синоптического масштаба в слое главного пикноклина вследствие бароклинной неустойчивости крупномасштабного течения.

Автор также считает, что возмущения синоптического масштаба в районах экспериментов Абиссаль и Полигон–70 порождаются в процессе бароклинной неустойчивости пассатных течений в верхнем слое и поддерживаются за счет их доступной потенциальной энергии (Никитин, 1977). Эти возмущения, включая вихри с размерами 100–500 км, концентрируются главным образом не в верхнем, а в промежуточном слое, включающим в себя слой главного пикноклина, причем максимум КЭ синоптических возмущений соответствует верхней части пикноклина, на что указывают и теоретические исследования (Keffer, 1983; Gill et al., 1974). Простые двухслойные модели показывают, что в процессе бароклинной неустойчивости течения, сосредоточенного в верхнем слое, происходит заполнение растущими возмущениями и нижнего, первоначально покоящегося слоя (см., например, Никитин, Тареев, 1972).

По мнению автора, обнаружение подповерхностного максимума КЭ региональных низкочастотных течений – результат, впервые полученный в эксперименте Полигон–70, – следует отнести ко второму по значению после обнаружения синоптического вихря результату этого эксперимента, впоследствии подтвержденному данными эксперимента Абиссаль и других экспериментов.

Литература

Балакин Р.А., Зограф Д.А., Першин А.А., Соков А.В. Придонная самовсплывающая буйковая станция для измерения течений на абиссальных глубинах // Комплексные океанографические исследования в тропической зоне Тихого океана / Под ред. О.П. Никитина. М.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 8–17.

Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 343 с.

Бышев В.И., Корт В.Г., Нейман В.Г. Особенности вертикальной структуры синоптических образований открытого океана // Океанологические исследования. 1981. № 34. С. 13–22.

Гандин Л.С. Оптимальная интерполяция векторных полей // Труды ГГО. 1964. Т. 165. С. 47–59.

Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.

Грачев Ю.М., Гущин О.А., Еникеев В.Х., Кошляков М.Н., Титов Б.В., Тихомирова Т.Г. Объективный анализ поля синоптической компоненты течений на горизонте 700 м по данным ПОЛИМОДЕ // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1978. Вып. 1. С. 11–22.

Грачев Ю.М., Кошляков М.Н., Михайличенко Ю.Г. Атлас синоптических течений на полигоне ПОЛИМОДЕ // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1984. Вып. 11. С. 1–262.

Корт В.Г., Нейман В.Г. Атлантический гидрофизический полигон 1970 г. // Атлантический гидрофизический Полигон–70 / Под ред. В.Г. Корта, В.С. Самойленко. М.: Наука, 1974. С. 3–19.

Кошляков М.Н. Вихри открытого океана // Синоптические вихри в океане / Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 292–426.

Кошляков М.Н., Грачев Ю.М. Среднемасштабные течения на гидрофизическом полигоне в тропической Атлантике // Атлантический гидрофизический Полигон–70 / Под ред. В.Г. Корта, В.С. Самойленко. М.: Наука, 1974. С. 163–180.

Кошляков М.Н., Грачев Ю.М., Еникеев В.Х. Кинематика поля синоптических вихрей открытого океана // Доклады АН СССР. 1980. Т. 252. № 3. С. 573–577.

Лежнев В.В., Никитин О.П. О выполнимости геострофических соотношений для низкочастотных течений в тропиках // Исследование океанографических процессов в тропической зоне Тихого океана / Под ред. А.Ф. Ляшенко, О.П. Никитина и В.Х. Германа. М.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 136–148.

Нежиховский Б.Р. Влияние погрешностей статистических характеристик на точность оптимальной интерполяции // Метеорология и гидрология. 1981. № 2. С. 77–85.

Никитин О.П. Баротропная и бароклинная неустойчивость (обзор линейной теории) // Исследование синоптической изменчивости океана. Севастополь: МГИ АН УССР, 1977. С. 209–230.

Никитин О.П. Восстановление синоптического поля скорости на полигоне ПОЛИМОДЕ на основе кусочной полиномиальной среднеквадратичной аппроксимации // Океанология. 1980. Т. 20. Вып. 3. С. 441–450.

Никитин О.П. Погрешности данных термозонда XBT T7 // Структура, кинематика и динамика синоптических вихрей. Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. С. 129–138.

Никитин О.П. Оценка уровня остаточного шума после низкочастотной фильтрации во временных рядах наблюдений компонент скорости течений // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1981. Вып. 3. С. 43–47.

Никитин О.П. Выделение синоптической составляющей из данных гидрологической съемки // Океанология. 1982. Т. 22. Вып. 4. С. 562–568.

Никитин О.П. Данные ХВТ ПОЛИМОДЕ // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР. 1984. Вып. 9. С. 3–11.

Никитин О.П. Влияние расстановки гидрологических станций на точность восстановления полей измеряемой величины и ее производных // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1984. Вып. 10. С. 3–12.

Никитин О.П. Гидрометеорологические исследования в перспективном районе освоения залежей железомарганцевых конкреций // Комплексные океанографические исследования в тропической зоне Тихого океана / Под ред. О.П. Никитина. М.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 3–8.

Никитин О.П. Исследования ГОИН по проекту «Абиссаль» // Исследование океанов и морей. Вып. 2 / Под ред. Ф.С. Терзиева. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1995. С. 90–95.

Никитин О.П. Проект 08.12 «Абиссаль». Отчет о результатах работ за 1991–1995 годы // Комплексные исследования океанов и морей Арктики и Антарктики / Под ред. С.С. Лаппо. М., 1996. Т. 8. С. 201–212.

Никитин О.П. Вертикальная структура синоптических течений в северо-восточной части тропической зоны Тихого океана // Океанология. 1997. Т. 37. Вып. 6. С. 819–831.

Никитин О.П. О внутригодовой низкочастотной изменчивости интенсивности океанских течений // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 14. № 5. С. 693–701.

Никитин О.П. Об особенностях вертикального профиля кинетической энергии низкочастотных составляющих скорости течений в северных тропиках Тихого и Атлантического океанов // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 72–86.

Никитин О.П., Первухина М.Э. Эволюция синоптических полей скорости течения и температуры воды по данным буйкового полигона в тропической зоне Тихого океана // Исследование океанографических процессов в тропической зоне Тихого океана / Под ред. А.Ф. Ляшенко, О.П. Никитина и В.Х. Германа. М.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 148–155.

Никитин О.П., Первухина М.Э. О контроле записей скоростей течений и температуры воды, полученных на океанских буйковых станциях // Комплексные океанографические исследования в тропической зоне Тихого океана / Под ред. О.П. Никитина. М.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 96–105.

Никитин О.П., Тареев Б.А. Меандры Гольфстрима как следствие бароклинной неустойчивости в простой двухслойной модели // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 9. С. 973–980.

Никитин О.П., Федоров А.С., Волкова Г.П. Опыт редактирования данных наблюдений за течениями и температурой в океане, полученных с помощью самописцев АЦИТТ. М.: ГОИН, 1995. 23 с. Деп. в ВИНИТИ 07.12.95. № 3276-В95.

Никитин О.П., Элькен Ю.Я. Выделение синоптической составляющей из данных единичной гидрологической съемки. Численные эксперименты // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1982. Вып. 6. С. 3–38.

Никитин О.П., Элькен Ю.Я. Влияние расстановки гидрологических станций на точность восстановления полей измеряемой величины и ее производных. Численные эксперименты // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1984. Вып. 10. С. 13–55.

Никитин О.П., Элькен Ю.Я. О погрешностях восстановления гидрологических полей и полей их дифференциальных характеристик методом аппроксимации ортогональными функциями // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 5. С. 743–750.

Пантелеев Г.Г. Трехмерный метод интерполяции поля скорости океанских течений // Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 4. С. 672–677.

Резник Г.М., Виноградова К.Г. О вычислении квазигеострофической функции тока по данным измерений автоматическими буйковыми станциями // Океанология. 1983. Т. 23. Вып. 4. С. 663–670.

Ямпольский А.Д. Опыт аппроксимации поля скорости течений на полигоне ПОЛИМОДЕ // Известия ПОЛИМОДЕ. М.: ИО АН СССР, 1982. Вып. 7. С. 45–50.

Burkov V.A., Polyakova I.V. Dynamic topography // The POLYMODE Atlas. Woods Hole Oceanographic Institution. Massachusetts. USA, 1986. P. 252–270.

Gill A.E., Green J.S.A., Simmons A.J. Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies // Deep-Sea Res. 1974. Vol. 21. No. 7. P. 499–528.

Harrison D.E., Heinmiller R.H. Upper ocean thermal variability in the Sargasso sea July 1977–July 1978; the POLYMODE XBT program // J. Phys. Oceanogr. 1983. Vol. 13. No. 5. P. 859–872.

Keffer T. The baroclinic stability of the Atlantic north equatorial current // J. Phys. Oceanogr. 1983. Vol. 13. No. 4. P. 624–631.

Nikitin O.P., Vinogradova K.G. Separation of the synoptic component of the temperature field from XBT-survey data and some applications // Ocean Modelling. Cambridge. England. 1980. No. 35. P. 5–8.

Nikitin O.P., Vinogradova K.G. Maps of hydrophysical characteristics: Temperature from XBT-observations // The POLYMODE Atlas. Woods Hole Oceanographic Institution. Massachusetts. USA, 1986. P. 223–251.

FROM THE POLYGON–70 EXPERIMENT TO THE ABYSSAL EXPERIMENT

Nikitin O.P.

N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6, Kropotkinskiy Lane, 119034, Moscow, Russian Federation,
e-mail: opnikitin@mail.ru
Submitted 13.08.2020, accepted 30.10.2020.

The article discusses the issues of reconstructing the mesoscale fields of hydrophysical characteristics from measurement data, as well as the layout of moorings in the ocean experiments Polygon–70, SDE POLYMODE and Abyssal, in which the author of the article took part. A number of important results of the analysis of the vertical structure and variability of mesoscale currents in the regions of these experiments are also presented.

Keywords: ocean, mesoscale currents, vertical structure of currents, moorings, moorings arrangement, objective analysis, reconstruction of fields of hydrophysical characteristics, reconstruction errors

References

Balakin R.A., Zograf D.A., Pershin A.A., and Sokov A.V. Pridonnaya samovsplyvayushchaya buykovaya stantsiya dlya izmereniya techeniy na abissal'nykh glubinakh (Bottom self-floating buoy station for measuring currents at abyssal depths). In: Kompleksnyye okeanograficheskiye issledovaniya v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Complex oceanographic studies in the tropical zone of the Pacific Ocean), Ed. O.P. Nikitin, Moscow: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 8–17.

Burkov V.A. and Polyakova I.V. Dynamic topography. In: The POLYMODE Atlas, Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, USA, 1986, pp. 252–270.

Byshev V.I. Sinopticheskaya i krupnomasshtabnaya izmenchivost' okeana i atmosfery (Synoptic and large-scale variability of the ocean and atmosphere), Moscow: Nauka, 2003, 343 p.

Byshev V.I., Kort V.G., and Neyman V.G. Osobennosti vertikal'noy struktury sinopticheskikh obrazovaniy otkrytogo okeana (Features of the vertical structure of synoptic formations of the open ocean). *Okeanologicheskiye issledovaniya*, 1981, No. 34, pp. 13–22.

Gandin L.S. Optimal'naya interpolyatsiya vektornykh poley (Optimal interpolation of vector fields). *Trudy GGO*, 1964, Vol. 165, pp. 47–59.

Gandin L.S. and Kagan R.L. Statisticheskiye metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh (Statistical methods for the interpretation of meteorological data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 360 p.

Gill A.E., Green J.S.A., and Simmons A.J. Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies. *Deep-Sea Res*., 1974, Vol. 21, No. 7, pp. 499–528.

Grachev Yu.M., Gushchin O.A., Yenikeyev V.Kh., Koshlyakov M.N., Titov B.V., and Tikhomirova T.G. Ob'yektivnyy analiz polya sinopticheskoy komponenty techeniy na gorizonte 700 m po dannym POLYMODE (Objective analysis of the field of the synoptic component of currents at a depth of 700 m according to POLYMODE data). *Izvestiya POLYMODE,* Moscow: IO AN SSSR, 1978, No. 1, pp. 11–22.

Grachev Yu.M., Koshlyakov M.N., and Mikhaylichenko Yu.G. Atlas sinopticheskikh techeniy na polygone POLYMODE (Atlas of synoptic currents at the POLYMODE polygon). *Izvestiya POLYMODE*, Moscow: IO AN SSSR, 1984, No. 11, pp. 1–262.

Harrison D.E. and Heinmiller R.H. Upper ocean thermal variability in the Sargasso sea July 1977–July 1978; the POLYMODE XBT program. *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, Vol. 13, No. 5, pp. 859–872.

Keffer T. The baroclinic stability of the Atlantic north equatorial current. *J. Phys. Oceanogr.,* 1983, Vol. 13, No. 4, pp. 624–631.

Kort V.G. and Neyman V.G. Atlanticheskiy gidrofizicheskiy polygon 1970 (Atlantic hydrophysical Polygon–70). In: Atlanticheskiy gidrofizicheskiy Polygon–70 (Atlantic hydrophysical Polygon–70), Ed's. V.G. Kort, V.S. Samoylenko, Moscow: Nauka, 1974, pp. 3–19.

Koshljakov M.N. Vihri otkrytogo okeana (Eddies of the open ocean). In: *Kamenkovich V.M., Koshljakov M.N., Monin A.S.* Sinopticheskie vihri v okeane (Synoptic eddies in the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, pp. 292–426.

Koshlyakov M.N. and Grachev Yu.M. Srednemasshtabnyye techeniya na gidrofizicheskom polygone v tropicheskoy Atlantike (Medium-scale currents at the hydrophysical polygon in the tropical Atlantic). In: Atlanticheskiy gidrofizicheskiy Polygon–70 (Atlantic hydrophysical Polygon–70), Ed's. V.G. Kort, V.S. Samoylenko, Moscow: Nauka, 1974, pp. 163–180.

Koshljakov M.N., Grachev Yu.M., and Enikeev V.H. Kinematika polja sinopticheskih vihrej otkrytogo okeana (Kinematics of the field of synoptic eddies of the open ocean). *Doklady AN SSSR,* Vol. 252, No. 3, pp. 573–577.

Lezhnev V.V. and Nikitin O.P. O vypolnimosti geostroficheskikh sootnosheniy dlya nizkochastotnykh techeniy v tropikakh (On the feasibility of geostrophic relationships for low-frequency currents in the tropics). In: Issledovaniye okeanograficheskikh protsessov v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Research of oceanographic processes in the tropical zone of the Pacific Ocean), Ed's A.F. Lyashenko, O.P. Nikitin, and V.Kh. German, Moscow: Gidrometeoizdat, 1989, pp. 136–148.

Nezhikhovskiy B.R. Vliyaniye pogreshnostey statisticheskikh kharakteristik na tochnost' optimal'noy interpolyatsii (Influence of errors of statistical characteristics on the accuracy of optimal interpolation). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1981, No. 2, pp. 77–85.

Nikitin O.P. Barotropnaya i baroklinnaya neustoychivost'. Obzor lineynoy teorii (Barotropic and baroclinic instability. Review of linear theory). In: Issledovaniye sinopticheskoy izmenchivosti okeana (Research of synoptic variability of the ocean), Sevastopol': MGI AN USSR, 1977, pp. 209–230.

Nikitin O.P. Vosstanovleniye sinopticheskogo polya skorosti na polygone POLYMODE na osnove kusochnoy polinomial'noy srednekvadratichnoy approksimatsii (Reconstruction of the synoptic velocity field on the POLYMODE polygon based on piecewise polynomial root-mean-square approximation). *Okeanologiya,* 1980, Vol. 20, No. 3, pp. 441–450.

Nikitin O.P. Pogreshnosti dannykh termozonda XBT7 (Errors of the XBT T7 thermal probe data). In: Struktura, kinematika i dinamika sinopticheskikh vikhrey (Structure, kinematics and dynamics of synoptic eddies), Sevastopol': MGI AN USSR, 1980, pp. 129–138.

Nikitin O.P. Otsenka urovnya ostatochnogo shuma posle nizkochastotnoy fil'tratsii vo vremennykh ryadakh nablyudeniy komponent skorosti techeniy (Estimation of the level of residual noise after low-frequency filtering in time series of observations of the current velocity components). *Izvestiya POLYMODE*, Moscow: IO AN SSSR, 1981, No. 3, pp. 43–47.

Nikitin O.P. Vydeleniye sinopticheskoy sostavlyayushchey iz dannykh gidrologicheskoy s'yemki (Separation of the synoptic component from the data of hydrographic survey). *Okeanologiya*, 1982, Vol. 22, No. 4, pp. 56–568.

Nikitin O.P. Dannyye XBT POLYMODE (Data of XBT POLYMODE). *Izvestiya POLYMODE,* Moscow: IO AN SSSR, 1984, No. 9, pp. 3–11.

Nikitin O.P. Vliyaniye rasstanovki gidrologicheskikh stantsiy na tochnost' vosstanovleniya poley izmeryayemoy velichiny i yeye proizvodnykh (Influence of the arrangement of hydrographic stations on the accuracy of reconstructing the fields of the measured quantity and its derivatives). *Izvestiya POLYMODE*, Moscow: IO AN SSSR, 1984, No. 10, pp. 3–12.

Nikitin O.P. Gidrometeorologicheskiye issledovaniya v perspektivnom rayone osvoyeniya zalezhey zhelezomargantsevykh konkretsiy (Hydrometeorological studies in a promising area for the development of deposits of ferromanganese nodules). In: Kompleksnyye okeanograficheskiye issledovaniya v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Complex oceanographic studies in the tropical zone of the Pacific Ocean), Ed. O.P. Nikitin, Moscow: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 3–8.

Nikitin O.P. Issledovaniya GOIN po proyektu «Abyssal» (GOIN research under the Abyssal project). In: Issledovaniye okeanov i morey (Oceans and seas research), No. 2, Ed. F.S. Terziyev, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1995, pp. 90–95.

Nikitin O.P. Proyekt 08.12 «Abyssal». Otchet o rezul'tatakh rabot za 1991–1995 gody (Project 08.12 «Abyssal». Report on the results of work for 1991–1995). In: Kompleksnyye

issledovaniya okeanov i morey, Arktiki i Antarktiki (Comprehensive studies of the oceans and seas, the Arctic and Antarctic), Ed. S.S. Lappo, Moscow, 1996, Vol. 8, pp. 201–212.

Nikitin O.P. Vertikal'naya struktura sinopticheskikh techeniy v severo-vostochnoy chasti tropicheskoy zony Tikhogo okeana (Vertical structure of synoptic currents in the northeastern part of the tropical zone of the Pacific Ocean). *Okeanologiya,* 1997, Vol. 37, No. 6, pp. 819–831.

Nikitin O.P. O vnutrigodovoy nizkochastotnoy izmenchivosti intensivnosti okeanskikh techeniy (On intra-annual low-frequency variability of the intensity of ocean currents). *Izvestiya RAN. Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 1998, Vol. 14, No. 5, pp. 69–701.

Nikitin O.P. Ob osobennostyakh vertikal'nogo profilya kineticheskoy energii nizkochastotnykh sostavlyayushchikh skorosti techeniy v severnykh tropikakh Tikhogo i Atlanticheskogo okeanov (On the features of the vertical profile of the kinetic energy of low-frequency components of the current velocity in the northern tropics of the Pacific and Atlantic oceans). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1999, No. 8, pp. 72–86.

Nikitin O.P. and El'ken Yu.Ya. Vydeleniye sinopticheskoy sostavlyayushchey iz dannykh yedinichnoy gidrologicheskoy s'yemki. Chislennyye eksperimenty (Extraction of the synoptic component from the data of a single hydrographic survey. Numerical experiments). *Izvestiya POLYMODE*, Moscow: IO AN SSSR, 1982, No. 6, pp. 3–38.

Nikitin O.P. and El'ken Yu.Ya. Vliyaniye rasstanovki gidrologicheskikh stantsiy na tochnost' vosstanovleniya poley izmeryayemoy velichiny i yeye proizvodnykh. Chislennyye eksperimenty (Influence of the arrangement of hydrographic stations on the accuracy of reconstructing the fields of the measured quantity and its derivatives. Numerical experiments). *Izvestiya POLYMODE,* Moscow: IO AN SSSR, 1984, No. 10, pp. 13–55.

Nikitin O.P. and El'ken Yu.Ya. O pogreshnostyakh vosstanovleniya gidrologicheskikh poley i poley ikh differentsial'nykh kharakteristik metodom approksimatsii ortogonal'nymi funktsiyami (On errors of reconstruction of hydrographic fields and fields of their differential characteristics by the method of approximation by orthogonal functions). *Okeanologiya*, 1986, Vol. 26, No. 5, pp. 743–750.

Nikitin O.P., Fedorov A.S., and Volkova G.P. Opyt redaktirovaniya dannykh nablyudeniy za techeniyami i temperaturoy v okeane, poluchennykh s pomoshch'yu samopistsev ATSITT (Experience in editing data on observations of currents and temperatures in the ocean obtained with the help of ATSITT recorders). Dep. v VINITI 07.12.95, No. 3276-B95, Moscow: GOIN, 1995, 23 p.

Nikitin O.P. and Pervukhina M.E. Evolyutsiya sinopticheskikh poley skorosti techeniya i temperatury vody po dannym buykovogo polygona v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Evolution of synoptic fields of current velocity and water temperature according to the data of a buoy polygon in the tropical zone of the Pacific Ocean). In: Issledovaniye okeanograficheskikh protsessov v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Research of oceanographic processes in the tropical zone of the Pacific Ocean), Ed's A.F. Lyashenko, O.P. Nikitin, and V.Kh. German, Moscow: Gidrometeoizdat, 1989, pp. 148–155.

Nikitin O.P. and Pervukhina M.E. O kontrole zapisey skorostey techeniy i temperatury vody, poluchennykh na okeanskikh buykovykh stantsiyakh (On the control of records of current velocities and water temperature obtained at ocean buoy stations). In: Kompleksnyye okeanograficheskiye issledovaniya v tropicheskoy zone Tikhogo okeana (Complex oceanographic studies in the tropical zone of the Pacific Ocean), Ed. O.P. Nikitin, Moscow: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 96–105.

Nikitin O.P. and Tareev B.A. Meandry Gol'fstrima kak sledstvie baroklinnoj neustojchivosti v prostoj dvuhslojnoj modeli (Gulf Stream meanders as a consequence of baroclinic

instability in a simple two-layer model). *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1972, Vol. 8, No. 9, pp. 973–980.

Nikitin O.P. and Vinogradova K.G. Separation of the synoptic component of the temperature field from XBT-survey data and some applications. *Ocean Modelling*, England: Cambridge, 1980, No. 35, pp. 5–8.

Nikitin O.P. and Vinogradova K.G. Maps of hydrophysical characteristics: Temperature from XBT-observations. In: The POLYMODE Atlas, Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, USA, 1986, pp. 223–251.

Panteleyev G.G. Trekhmernyy metod interpolyatsii polya skorosti okeanskikh techeniy (Three-dimensional method of interpolation of the velocity field of ocean currents). *Okeanologiya,* 1990, Vol. 30, No. 4, pp. 672–677.

Reznik G.M. and Vinogradova K.G. O vychislenii kvazigeostroficheskoy funktsii toka po dannym izmereniy avtomaticheskimi buykovymi stantsiyami (Calculation of the quasigeostrophic stream function from the data of measurements by automatic buoy stations). *Okeanologiya,* 1983, Vol. 23, No. 4, pp. 663–670.

Yampol'skiy A.D. Opyt approksimatsii polya skorosti techeniy na polygone POLYMODE (Experience of approximation of the current velocity field at the POLYMODE polygon). *Izvestiya POLYMODE,* Moscow: IO AN SSSR, 1982, No. 7, pp. 45–50.