ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Д. А. Чурин

ФГБНУ «АтлантНИРО», Калининград churind@atlantniro.ru

Чурин Д. А. Поверхностные течения Антарктической части Атлантики по данным спутниковой альтиметрии // Труды АтлантНИРО. 2017. Новая серия. Т. 1, № 1. Калининград : АтлантНИРО. С. 24–38.

Рассмотрены течения, приуроченные к субширотным зонам Антарктической части Атлантики в районе 48–63° ю.ш. и 72–20° з.д. на основе альтиметрических данных, полученных с января 1993 г. по декабрь 2012 г. Показано, что альтиметрия качественно описывает пространственные особенности поля течений и мезомасштабных вихрей. Это дало возможность использовать данный подход для анализа пространственно-временной изменчивости динамики в море Скотия. Кластерный анализ абсолютной динамической топографии позволил выделить основные динамические системы данного района и выполнить их пространственно-временное описание. Максимальные скорости течения наблюдаются в Южной полярной фронтальной зоне (до 153 см/с). В сезонном аспекте ослабление скорости течения происходит летом, а его усиление – в зимний период. Наиболее слабые течения отмечаются в северной периферии моря Уэдделла. Для данного района характерно минимальное вихреобразование. Циклонические вихри с невысокими амплитудами преобладают над антициклоническими. Эта особенность характерна для всего моря Скотия в целом.

Ключевые слова: Антарктическая часть Атлантики, Антарктическое циркумполярное течение, альтиметрия, течения, криль

Churin D. A. Surface currents of the Antarctic part of the Atlantic based on the satellite altimetry data // Trudy AtlantNIRO. 2017. New series. Vol. 1, № 1. Kaliningrad : AtlantNIRO. P. 24–38.

Carrents confined to the sub-latitudinal zones of the Antarctic part of the Atlantic in the area of 48-63° S and 72-20° W are considered based on the altimetric data obtained in the period from January 1993 to December 2012. It is shown that the altimetry qualitatively describes the spatial characteristics of the carrents field and mesoscale eddies. This made it possible to use this approach to analyze the spatial-temporal variability of dynamics in the Scotia Sea. Cluster analysis of absolute dynamic topography enabled to identify the main dynamic systems of a given area and make their spatial-temporal description. The maximum current velocity is observed in the South polar frontal zone (up to 153 cm / s). In the seasonal aspect, the weakening of current velocity occurs in the summer and its intensification appears during the winter period. The weakest currents are observed in the northern periphery of the Weddell Sea. Minimal eddy formation is typical for this area. Cyclonic eddies with low amplitudes predominate over anticyclonic ones. Generally, this feature is peculiar to the entire Scotia Sea.

Key words: the Antarctic part of the Atlantic, Antarctic circumpolar current, altimetry, currents, krill

Введение

Самым мощным элементом циркуляционной системы Мирового океана является Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), опоясывающее Антарктический континент с запада на восток. Крупномасштабные квазизональные океанские течения, к которым относится АЦТ, как правило, разбиваются на отдельные струи, характеризующиеся повышенными горизонтальными градиентами гидрофизических и гидрохимических свойств. В свете классической класссификации АЦТ (рис. 1), предложенной в середине 90-х годов ХХ века [Orsi et al., 1995], АЦТ состоит из трех струй, проходящих с севера на юг в пределах Субантарктического фронта (САФ), Полярного фронта (ПФ) и Южного фронта АЦТ (ЮАЦТФ) (рис. 2). С наступлением эры спутниковых наблюдений за поверхностью океана представления о струйной структуре АЦТ получили существенное развитие. В АЦТ стали выделять до девяти струй: три струи в зоне САФ, три струи в зоне ПФ, две – в зоне ЮАЦТФ и одну – соответствующую южной границе АЦТ [Sokolov et al., 2009]. В последние годы появились данные о том, что АЦТ может иметь еще более тонкую струйную структуру [Тараканов и др., 2014 а]. В частности, к югу от Африки было выделено двенадцать струй АЦТ [Тараканов и др., 2014 б].

Бароклинная неустойчивость струйных течений в океане ответственна за их меандрирование и образование вихрей в результате отрыва этих меандров от основной струи. Интенсивность вихреобразования в АЦТ неравномерна как по периметру течения, так и по его сечению [Morrow, 1994]. Наиболее активно этот процесс развит на северной периферии течения, в зоне САФ в нескольких районах Южного океана. На южной периферии АЦТ вихреобразование также играет важную роль в меридиональном обмене между АЦТ и приполярными водами Южного океана. К числу районов с наиболее интенсивным вихреобразованием относятся северо-восточные периферии круговоротов Росса в Тихом океане и Уэдделла в Атлантическом, а также южная часть моря Скотия, представляющая собой фактически зону схождения АЦТ и северо-западной периферии круговорота Уэдделла [Шульговский, 2005; Sokolov et al., 2009]. Вихри, образовавшиеся в последнем из этих районов, играют важнейшую роль в распространении биогенных элементов в юго-восточном и восточном секторах моря Скотия и тем самым существенным образом определяют биопродуктивность района.



ШПВ – Шельфовая поверхностная водная масса; АПВ – Антарктическая поверхностная водная масса; САПВ – Субантарктическая поверхностная водная масса; АПрВ – Антарктическая промежуточная водная масса; ГВ – глубинная водная масса; ВЦГВ – верхняя Циркумполярная глубинная водная масса; НЦГВ – нижняя Циркумполярная глубинная водная масса; АДВ – Антарктическая донная водная масса; S_{мин} – промежуточный минимум солености; Т_{макс} – глубинный максимум температуры; S_{мах} – глубинный максимум солености; ПШФ – Пришельфовый фронт; СкФ – Склоновый фронт; АД – Антарктическая дивергенция; ВФЗА (ЮАЦТФ) – вторичная фронтальная зона Антарктики; ПФ – Полярный фронт; ЮПФЗ – Южная полярная фронтальная зона; САФ – Субантарктический фронт





Рис. 2. Схема моря Скотия с положением основных фронтов [Шульговский, 2005] Fig. 2. Scheme of the Scotia Sea and position of main fronts [Shul'govskil, 2005]

В частности, в этих вихрях может происходить агрегация скоплений криля, имеющих промысловое значение, с последующим их переносом из районов Южных Шетландских и Южных Оркнейских островов (южная и юго-западная части моря Скотия) в район о. Южная Георгия (северо-восточная часть моря Скотия) [Масленников, 2003].

Цель данного исследования – изучение струйной структуры АЦТ и поля мезомасштабных вихрей в море Скотия на основе спутниковых данных и данных прямых измерений в толще океана. Конкретными задачами исследований являются: а) классификация поверхностных вод в море Скотия по данным спутниковой альтиметрии методами многомерного статистического анализа; б) описание вихрей, приуроченных к конкретным регионам (их знак, амплитуды, скорости вращения, время жизни, траектории и скорости перемещения); в) верификация анализа данных спутниковой альтиметрии путем их сопоставления с данными прямых измерений в толще океана.

Материалы и методы

Основная методологическая идея работы заключалась в совместном использовании разнообразных современных данных – спутниковых альтиметрических данных и данных прямых измерений в толще океана. Анализ выполнен с помощью нечасто используемых в подобных исследованиях статистических методов, в частности: кластерного анализа – для выделения пространственных районов с когерентными изменениями уровня абсолютной динамической топографии (АДТ) и скоростей течений, гармонического анализа (разложение в ряд Фурье) для исследования цикличности колебаний.

Спутники-альтиметры измеряют расстояние от спутника до поверхности океана, которое пересчитывается в аномалию уровня относительно некоторой средней (по времени) геострофической уровенной поверхности (средней АДТ) океана. Данные по аномалии уровня океана находятся в открытом доступе на сайте французского агентства CLS [www.aviso.altimetry.fr].

На основе этих данных разработана методика выделения вихрей, с помощью которой создана база данных по вихрям [cioss.coas.oregonstate.edu], в которой каждому вихрю присвоен идентификационный номер и прослежена история его перемещения [Chelton et al., 2011]. В рассматриваемый период 1993–2011 гг. база данных содержит сведения о

положении вихря (географические координаты), уникальном номере, «времени жизни», амплитуде (см), диаметре (км) и скорости вращения (см/с).

База данных по спутниковой альтиметрии (абсолютная динамическая топография, составляющие скорости течения) представляет собой набор средненедельных данных (осредненных за 6 дней) в узлах регулярной сетки координат. Шаг между узлами сетки составляет 0,25°, а в базе данных по скоростям течения равен 0,333°.

Период используемых данных – январь 1993 г. – декабрь 2012 г. Исследуемый район находится в границах 48–63° ю.ш., 72–20° з.д. Базы данных созданы с использованием системы управления базами данных *Microsoft Visual FoxPro Professional*, при помощи которой произведен расчет среднемесячных значений в конкретном узле географической сетки координат, расчет среднемноголетней нормы за 1993–2012 гг.

С целью разделения рассматриваемой акватории на отдельные регионы с когерентным характером колебаний абсолютной динамической топографии использовался кластерный анализ по методу Уорда с расчетом евклидовых расстояний в качестве меры близости. При классификации использовались расчетные среднегодовые значения АДТ в узлах регулярной сетки. Шаг между узлами сетки составляет 1° по широте и долготе. Затем, исходя из формальных (пороговое расстояние) и физических соображений, определялось оптимальное количество классов. Подобная классификация часто применяется для анализа океанологических данных и подробно описана [Чернышков и др., 2003; Малинин и др., 2009].

Суть метода состоит в следующем. На первом шаге вычисляется матрица расстояний для *n* объектов и выбирается та пара, которая имеет наименьшую меру различия. После этого пересчитывается расстояние от центра тяжести этой пары до остальных точек и добавляется в матрицу расстояний. Затем определяется минимальное расстояние и, если оно стягивает пару точек, не связанную с первой парой, то формируется новая группа. На следующем шаге производится пересчет расстояния от новой группы до оставшихся точек. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока все точки не объединятся в одну группу. Последовательность объединения может быть представлена в виде древовидной схемы – дендрограммы.

Для изучения межгодовой цикличности использовался спектральный анализ Фурье, который заключается в разложении исходного ряда на различные частотные составляющие. Спектр показывает вклад колебаний с разными частотами в общую энергию процесса [Белоцерковский, 1993]. Формула преобразования дискретного ряда в ряд гармоник выглядит как:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp(-j\frac{2\pi}{N}nk),$$

где k = 0...N - 1;

S(k) – отчет соответствующего спектра.

Для сопоставления данных спутниковой альтиметрии с прямыми контактными измерениями использовалась информация, полученная в результате реализации проекта Clivar/CO2 Repeat Hydrography [currents.soest.hawaii.edu/drvar_co2]. Она включала экспедиционные данные гидрофизического разреза A16S 2005a (WOCE), полученные на судне «RONALD H. BROWN» с 11 января по 24 февраля 2005 г. Измерения течения выполнялись при помощи LADCP RDI-300WH.

Результаты и обсуждение

Абсолютная динамическая топография в море Скотия. Динамическая топография, рассчитанная по данным спутниковой альтиметрии, позволяет исследовать пространственновременную изменчивость поверхностных течений, начиная с синоптического масштаба, а также выделять положение границ течений и фронтальных зон [Лебедев и др., 2011].

Уровень океана, его наклон и их изменения во времени во многом отображают процессы, происходящие в океане с различными пространственными и временными масштабами. Циркуляция вод имеет свое непосредственное отражение в уровенной поверхности океана. Различными авторами показано, что характеристики поверхностных течений, а также положения фронтальных зон и мезомасштабных вихрей, рассчитанные с помощью альтиметрических данных, соответствуют сведениям натурных наблюдений [Chelton et al., 2011; Кошляков, 2013; Тараканов и др., 2014; Vasquez, 2013].

Представление о среднемноголетней динамической топографии в районе Антарктической части Атлантики (АчА) было получено в результате усреднения еженедельных данных в узлах регулярной сетки координат за период 1993–2012 гг. (рис. 3 а). Уровенная поверхность в районе АчА принимала значения от –146 отн. дин. см на юго-западе в районе моря Уэдделла до 46 отн. дин. см западнее Фолклендских островов.

В районе Южных Сандвичевых островов наблюдался вынос смешанных вод моря Уэдделла на север, северо-запад. Нарушение зональности потока отмечалось в районе Фолклендского течения. Представление о пространственной изменчивости интенсивности колебаний уровня моря по спутниковым данным дает поле среднеквадратических отклонений этого параметра за 20 лет (рис. 3 б). В нем выявлены зоны повышенной и пониженной интенсивности низкочастотных колебаний. Наибольшая динамическая изменчивость характерна для районов 54–58° ю.ш., 45–72° з.д. и 48–53° ю.ш., 25–55° з.д.

Классификация вод. В результате классификации абсолютной динамической топографии по пространству (в качестве признаков использовались среднегодовые значения АДТ в узлах регулярной сетки) были получены 5 классов, различающихся по характеру изменчивости среднегодовых значений динамической топографии (рис. 4). Распределение полученных классов по пространству приведено на рисунке 5. Полученное районирование согласуется с существующими представлениями о географическом расположении основных динамических систем данного района.



Рис. 3. Среднемноголетняя (январь 1993 г. – декабрь 2012 г.) динамическая топография (а) и среднеквадратическое отклонение уровня океана (б) по данным спутниковой альтиметрии, отн. дин. см

Fig. 3. Long-term annual average (January 1993 – December 2012) dynamic topography (a) and standard deviation of the sea level (6) based on the satellite altimetry data, rel. dyn. cm



Рис. 4. Дендрограмма иерархической классификации уровенной поверхности Fig. 4. Dendrogram of hierarchical classification of the surface level

На основе кластер-анализа выделяются два основных района изменчивости динамических процессов, соответствующих северной и южной частям моря. Граница между этими системами хорошо согласуется с Южным фронтом АЦТ (ЮАЦТФ), отделяющим воды АЦТ от субполярных вод. В каждой из описанных циркуляционных систем выделяется несколько подрайонов: Северная граница вод моря Уэдделла – ВМУ (Ia), Южный фронт АЦТ – ВФЗ (Iб), Субантарктическая поверхностная водная масса – САПВ (IIa), Южная полярная фронтальная зона – ЮПФЗ (IIб) и Антарктическая поверхностная водная масса – АПВ (IIв).



Подобное дробление не приводит к значительному уменьшению межклассовых расстояний, но позволяет получить более подробное описание динамических процессов. В работе рассматриваются именно эти 5 подрайонов. Некоторые статистические характеристики АДТ, полученные по еженедельным данным в соответствующих районах за период 1993–2012 гг., приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики абсолютной динамической топографии в выделяемых классах, отн. дин. см Statistical characteristics of the absolute dynamic topography in the allocated classes, rel. dyn. cm

Показатель	BMУ (Ia)	ВΦЗ (Іб)	CAПB (IIa)	ЮПФЗ (Шб)	АПВ (IIв)
Среднее	-138,9	-117,3	28,2	-34,1	-86,5
Минимум	-150,2	-135,1	-22,5	-75,6	-114,2
Максимум	-123,1	-93,6	59,8	10,9	-48,5
Среднее квадратическое	5,5	7,2	14,6	19,1	12,1
отклонение					
Дисперсия	30,2	51,8	211,7	365,5	145,3
Площадь, %	27,5	23,8	13,4	18,6	16,7

Проведенное разделение на подрайоны подтверждает сложный многоструйный характер АЦТ в море Скотия. В целом картина динамики вод совпадает с классическими представлениями о физико-географической подразделенности данного региона[Orsi et al., 1995; Масленников, 2003].

Была выявлена характерная особенность исследованного региона в виде сравнительно широких фронтальных зон, в частности ЮАЦТФ (ВФЗ). Это объясняется тем, что классификация изменчивости динамической топографии была проведена по времени, а именно зоны фронтов характеризуются наибольшей вариацией в пространстве. Соответственно изменения положения фронтов и связанных с ними систем течений во времени и пространстве могут охватывать значительные районы.

Скорости течения в море Скотия по данным спутниковой альтиметрии. Для анализа скоростей течений в АчА и море Скотия в частности использовался массив данных AVISO по поверхностным геострофическим течениям, основанный на данных спутниковой альтиметрии. Анализировались еженедельные данные с пространственным разрешением 0,333°. Для построения кары среднемноголетнего распределения скоростей течений используется тоже пространственное и временное разрешение за период 1993–2012 гг.

Проведенная классификация вод и выделение когерентных районов, сопоставимых с пространственным распределением фронтальных зон и водных масс, позволяет их охарактеризовать статистически. Некоторые среднемноголетние характеристики скорости течения приведены в табл. 2. На рис. 6 представлена схема сопоставления распределения среднемноголетних скоростей течений, АДТ (изолинии) и распределения классов кластерного анализа.

Таблица 2

Среднемноголетние статистические характеристики скорости течения в выделенных классах, см/с Long-term annual average statistical characteristics of current velocity in the allocated classes, cm/s

Показатель	BMУ (Ia)	ΒΦ3 (Ιδ)	CAПB (IIa)	ЮПФЗ (Шб)	АПВ (IIв)
Среднее	3,7	8,7	14,9	25,4	17,6
Максимум	47,4	76,1	140,7	153,4	112,2
Среднее					
квадратическое	3,2	6,7	13,0	16,9	11,8
отклонение					
Дисперсия	10,2	44,3	169,4	286,4	138,5



Рис. 6. Среднемноголетнее распределение скоростей течений, абсолютной динамической топографии (изолинии) и классов кластерного анализа за период 1993–2012 гг.
Fig. 6. Long-term annual average distribution of current velocity, the absolute dynamic topography (isolines) and classes of cluster analysis for the period 1993–2012

Фактически рассматриваемая область охватывает лишь северную периферию моря Уэдделла и ее границу (рис. 7, Ia). Это – район наиболее слабых течений. Средняя скорость составляет 3,7 см/с, преобладают направления восточных и северных румбов. В 80 % случаев скорость изменяется от 0 до 10 см/с. Усиление до 20 см/с характерно для восточных и северо-восточных составляющих скорости. Поток выносимых уэдделломорских вод на север в районе дуги Южных Сандвичевых островов имеет скорости до 10 см/с. Минимальные значения дисперсии и стандартного отклонения в море Скотия свидетельствуют о незначительном вихреобразовании.

Южный фронт АЦТ (ВФЗ) является районом высокой биологической продуктивности, поэтому анализ гидрофизических процессов имеет большое значение как в экологическом, так и в прикладном промысловом плане. По сравнению с северными районами здесь преобладают достаточно низкие скорости. Средняя скорость для данного района составляет 8,7 см/с. Чаще всего наблюдаются скорости от 0 до 20 см/с (68 %), 10–25 см/с – 25 % (рис. 7, 16). Характерное направление – восточное. Отмечается отклонение потока в северо-западном направлении по дуге Южных Сандвичевых островов в район о. Южная Георгия со скоростями 0–10 см/с, гораздо реже – 10–20 см/с. Именно с этим потоком переносится антарктический криль из района Южных Оркнейских островов к о. Южная Георгия [Масленников, 2003]. Это особенно важно в свете того, что криль является одной из основ трофической сети данного района, его отсутствие крайне негативно сказывается на популяции птиц и млекопитающих в районе о. Южная Георгия. Помимо биологических факторов, такие ситуации могут складываться при ослаблении течения, а также при отсутствии мезомасштабных вихрей в районе о. Южная Георгия, в которых криль как пассивный пловец удерживается и концентрируется.

Для Субантарктической поверхностной водной массы (САПВ) характерны умеренные средние значения скорости течения (сред. 14,9 см/с). В целом для этой области в 76 % случаев преобладают скорости от 0 до 20 см/с (рис. 7, IIa). Однако эту область можно разделить на 2 географических подрайона с существенно отличными характеристиками – воды пр. Дрейка и Патагонские. В пр. Дрейка зачастую наблюдаются скорости от 30 до 70 см/с, максимальная зафиксированная по альтиметрическим данным скорость для данного подрайона составляет 140 см/с. Направления течения преимущественно северо-восточное. Для этого района характерны наибольшие в САПВ значения дисперсии и стандартного отклонения. Это происходит из-за достаточно интенсивных мезомасштабных вихрей, проходящих через северную часть пр. Дрейка. Для Патагонских вод характерны значительно более умеренные скорости (преимущественно 0–30 см/с) и северное направление течения.

Результаты усреднения данных скорости течения за 7 дней для района САПВ позволили охарактеризовать сезонную и межгодовую изменчивость поля скорости для конкретной зоны в целом (рис. 8). График изменчивости усредненной скорости течения (рис. 8 а) дает представления о периодах усиления и ослабления потока. Минимальные значения отмечались 15 мая 2002 г. и 28 сентября 2005 г. В это время наблюдалось значительное ослабление течения в северной части пр. Дрейка и западной периферии Фолклендского течения. В периоды значительного усиления наблюдается обратная ситуация – усиление течения в северной части пр. Дрейка и проникновение этих вод на Патагонский шельф в координатах 63°34′ з.д., 54°27′ ю.ш. На рис. 8 б представлена среднемесячная норма скорости течения, полученная путем усреднения данных за период 1993–2012 гг. Результаты свидетельствуют о некотором ослаблении течения в зимние и весенние месяцы и усилении в летние и осенние. Проведенный спектральный анализ суточных значений скорости течения в 1993–2012 гг. показал, что наиболее существенными являются полугодовая, годовая и трехлетняя периодичности.







Рис. 8. Средние значения (а) и среднемесячная норма (б) скорости течения для района САПВ (Па) за период 1993–2012 гг. Fig. 8. Mean values (a) and average rate of (б) current velocity for the SASW region (Па) for the period 1993–2012

Максимальные скорости течения наблюдаются в Южной полярной фронтальной зоне (ЮПФЗ) при средней скорости 25 см/с. По данным спутниковой альтиметрии, максимальная скорость для данного района была зафиксирована 6 мая 1998 г. в координатах 48°23′ ю.ш., 38°41′ з.д. и составила 153 см/с. ЮПФЗ является областью наиболее интенсивного вихреобразования для данного района, это косвенно подтверждается максимальными значениями дисперсии и стандартного отклонения. Преобладают скорости от 20 до 70 см/с – в 50 % наблюдаемых случаев (рис. 7, IIб). Для течения характерны направления восточных румбов, наибольшая повторяемость направления – 70°.

Для ЮПФЗ наблюдается наибольшая меж- и внутригодовая изменчивость в данном районе (рис. 9 а). Наибольшая интенсивность течения отмечалась 2 января 2008 г., наименьшая –7 декабря 2011 г. (рис. 10). По результатам спектрального анализа выделены следующие периоды: полугодовой, полуторалетний, четырехлетний.

Поток Антарктической поверхностной водной массы (АПВ) (рис. 7, IIв) направлен на запад, северо-запад со скоростями от 0 до 20 см/с (66 %), также наблюдаются и более высокие скорости от 20 до 50 см/с (32 %). Нарушение зональности потока наблюдается на северо-восток от о. Южная Георгия, однако его скорость несколько ниже 0–30 см/с.

Внутригодовая изменчивость схожа с районом ЮПФЗ – усиление летом и ослабление зимой (рис. 11 б). Наиболее значимыми являются следующие периоды: полугодовой, годовой и пятилетний.



Рис. 9. Средние значения (а) и среднемесячная норма (б) скорости течения для ЮПФЗ за период 1993–2012 гг.

Fig. 9. Average values (a) and the average rate of (6) the current velocity for SPFZ for the period 1993–2012



Рис. 10. Распределение поля скорости течений 02.01.2008 г. и 07.12.2011 г. Fig. 10. Distribution of the currents velocity field, 02.01.2008 and 07.12.2011



Рис. 11. Средние значения (а) и среднемесячная норма (б) скорости течения для АПВ за период 1993–2012 гг. Fig. 11. Average values (а) and the average rate of (б) the current velocity for the reclosure for the period 1993–2012

Сопоставление данных спутниковой альтиметрии (СА) и контактных измерений (ADCP). Для сопоставления были использованы данные пространственного распределения поля скорости течения, полученные путем прямых измерений прибором RDI-300WH, и данные спутниковой альтиметрии. Гидрофизический разрез A16S_2005a (WOCE) был выполнен с 18 января 2005 г. по 21 февраля 2005 г. Район исследований охватывал значительную часть Южной Атлантики от северо-восточной части моря Скотия и выходил далеко за пределы Антарктической части Атлантики до экваториальных широт (рис. 12). Разрез состоял из 116 вертикальных зондирований водной толщи.

Использованные альтиметрические данные представляют собой объединенные данные с нескольких спутников за 7 суток, усредненные в узлы регулярной сетки координат с шагом 0,33° по широте и долготе. Были выбраны узлы, наиболее близко расположенные к гидрофизическим станциям, в среднем удаленность сопоставляемых точек составила 9 км на горизонте 50 м.

Сопоставление усредненных данных спутниковой альтиметрии и контактных измерений достаточно затруднено и несет в себе ошибки, связанные с объединением данных с нескольких спутников в узлы регулярной сетки координат и различным временем измерения внутри дня. Для более точного анализа возможно сравнение вдольтрековых данных от конкретного спутника и контактных измерений. Это сравнение показывает удовлетворительное совпадение данных.

Чаще всего данные скорости течения, рассчитанные по спутниковой альтиметрии, несколько занижены относительно фактически измеренных. Среднее отклонение составляет 56 % по скорости от данных ADCP. Отклонение по направлению достигает 63°. Значительно лучший результат дает сопоставление изменчивости поля течения по пространству. Высокий коэффициент корреляции (0,7) зональной и меридиональной составляющих вектора скорости, полученный по данным прямых наблюдений и CA, свидетельствует о высокой связи этих

параметров. Большинство вихрей, обнаруженных по гидрофизическим данным, нашли отражение в аномалии уровня, рассчитанной по альтиметрическим данным. Результаты сопоставления данных спутниковой альтиметрии и прямых измерений говорят о том, что альтиметрия достаточно достоверно описывает пространственные особенности поля течений, зоны их интенсификации и ослабления, а также мезомасштабные вихри и фронтальные зоны. Однако полученные по спутниковой альтиметрии значения скорости могут быть существенно занижены.



Рис. 12. Скорость течений по данным CA и ADCP на горизонте 50 м. Красные стрелки – вектора скорости по данным ADCP, черные – по данным альтиметрии. Изолиниями показана абсолютная динамическая топография. (18.01–16.02.2005 г.)

Fig. 12. Velocity of currents according to SA and ADCP data on the horizon of 50 m. Red lines show velocity vectors based on the ADCP data, black lines denote velocity vectors based on the altimetry data. Isolines show absolute dynamic topography (18.01–16.02.2005)

Заключение

Выполненный анализ мезомасштабной динамики в море Скотия по данным спутниковой альтиметрии показал значительное занижение скорости потока относительно прямых наблюдений. Однако альтиметрия качественно описывает пространственные особенности поля течений и мезомасштабных вихрей, что позволяет использовать эти данные для анализа пространственно-временной изменчивости динамики в море Скотия. Кластерный анализ абсолютной динамической топографии позволил выделить основные динамические системы данного района и сделать их пространственно-временное описание. Максимальные скорости течения наблюдаются в ЮПФЗ (до 153 см/с), выявлено ослабление скорости течения летом и усиление в зимний период. Выполненный спектральный анализ выделил полугодовой, полуторалетний и четырехлетний периоды. Наиболее слабые течения и минимальное вихреобразование отмечены в северной периферии моря Уэдделла. ЮАЦТФ (ВФЗ) является районом высокой биологической продуктивности. Средняя скорость для данного района составляет 8,7 см/с. Отмечается отклонение потока в северо-западном направлении по дуге Южных Сандвичевых островов в район о. Южная Георгия со скоростями 0–10 см/с, гораздо реже – 10–20 см/с. С этим потоком может переноситься антарктический криль из района Южных Оркнейских островов к о. Южная Георгия.

Список литературы

Белоцерковский А. В. Спектральный анализ в гидрометеорологии. СПб. РГГМУ, 1993. 64 с.

Лебедев С. А., Шауро С. Н. Уточнение границ Южного океана и Антарктического циркумполярного течения по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 245–255.

Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология Юго-Восточной части Тихого океана // Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. Т. І. 278 с.

Масленников В. В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: ВНИРО, 2003. С. 295.

Методы многомерного статистического анализа в промысловоокеанологических исследованиях / П.П. Чернышков [и др.] // Калининград: АтлантНИРО, 2003. 164 с.

Тараканов Р. Ю. Струи Антарктического циркумполярного течения в центральной части пролива Дрейка по данным съемки в октябре-ноябре 2008 г. // Океанология. 2014. Т. 54, № 1. С. 5–11.

Тараканов Р. Ю., Гриценко А. М. Структура струй и фронтов к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. // Океанология. 2014. Т. 54, № 3. С. 437–450.

Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений в октябре-ноябре 2011 г. / М. Н. Кошляков [и др.] // Океанология. 2013. Т. 53, № 1. С. 5–16.

Шульговский К. Е. Крупномасштабная изменчивость океанологических условий в западной части Атлантического сектора Антарктики и ее влияние на распределение криля. Калининград: АтлантНИРО, 2005. 160 с.

Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011, № 91. P. 167–216.

Orsi A. H., Whitworth T. III, Nowlin W. D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Research I. 1995, № 42. P. 641–673.

Sokolov S., Rintoul S. R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part B: Variability and relationship to sea surface height // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. C11019, doi: 10.1029/2008JC005248.

Sokolov S., Rintoul S. R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part A: Mean circumpolar paths // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. C11018, doi: 10.1029/2008JC005108.

Surface eddy momentum flux and velocity variances in the Southern Ocean from Geosat altimetry / R. Morrow [et al.] // J. of Physical Oceanography. 1994, № 24. P. 2050–2071.

The influence of oceanographic processes on jack mackerel (Trachurus murphyi) larval distribution and population structure in the southeastern Pacific Ocean / S. Vasquez [et al.] // ICES J. of Mar. Sci. 2013. 11 p. URL: http://icesjms.oxfordjournals.org/content/70/6/1097.short?rss=1 (дата обращения: 11.01.2017).