

Особенности пространственной изменчивости полей гидрологических и биооптических элементов в различных районах Мирового океана

Д.В. Буров¹, М.С. Пермяков², Т.И. Тархова²

¹*Морской государственный университет им. Г.И. Невельского
690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
E-mail: burov@msun.ru;*

²*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mails: permyakov@poi.dvo.ru, tit@poi.dvo.ru*

Представлены характеристики пространственной изменчивости (корреляционные, структурные функции и спектры) океанологических параметров верхнего слоя различных районов Мирового океана, полученные по данным проточных судовых измерений температуры, солености воды и спектров лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) в ходе кругосветной экспедиции на парусном учебном судне «Надежда» в 2003-2004 гг. Проведен сравнительный анализ с оценками, рассчитанными по спутниковым данным за тот же период в районах судовых измерений.

Введение

Исследование пространственной изменчивости верхнего слоя океана в различных географических районах является актуальной задачей современной океанологии и физики океана, имеющие важное практическое значение для развития методов комплексного мониторинга океана и морей с помощью дистанционных методов. Основные ее статистические характеристики – пространственные корреляционные и структурные функции, спектры, отражают динамику вод в верхнем слое океана и морей и могут быть использованы для идентификации физических механизмов изменчивости, связанной с волновыми, вихревыми возмущениями и турбулентностью в широком спектре масштабов [1]. Эти же характеристики на масштабах менее размера пиксела сканеров дистанционных систем, которые можно получить только в ходе непрерывных судовых проточных измерений, необходимы при разработке оптимальных алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования океана [2].

В работе представлены оценки статистических характеристик пространственной изменчивости полей температуры, солености и концентрации хлорофилла «А» в различных районах Мирового океана, полученные по данным проточных судовых измерений.

Данные и методы обработки

В работе использовались данные комплексных судовых измерений температуры, солености воды и спектров лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) судовым проточным флуориметром, полученные в ходе кругосветной экспедиции 2003-2004 годов на парусном учебном судне «Надежда» [3, 4].

Концентрация хлорофилла «а» определялась из спектров ЛИФ как отношение интенсивности спектральных пиков, соответствующих комбинационному рассеянию морской воды и флуоресценции хлорофилла [3, 4]. Для снижения погрешностей таких оценок проводилась комплексная обработка записей интенсивности всех 95 спектральных каналов ЛИФ как независимых временных реализаций, что позволило снизить уровень шума в концентрации хлорофилла «а» до 5-10 %. Оценки автокорреляционных, структурных функций и спектров, проводились на участках однородности, которые выделялись вдоль маршрута судна по доверительным интервалам оценок дисперсии в скользящем окне, содержащим 50-60 отчетов [5] (рис. 1). Всего вдоль маршрута судна

было выделено 72 участка однородности протяженностью от 14 км в Корейском проливе до 303 км в экваториальной Атлантике.

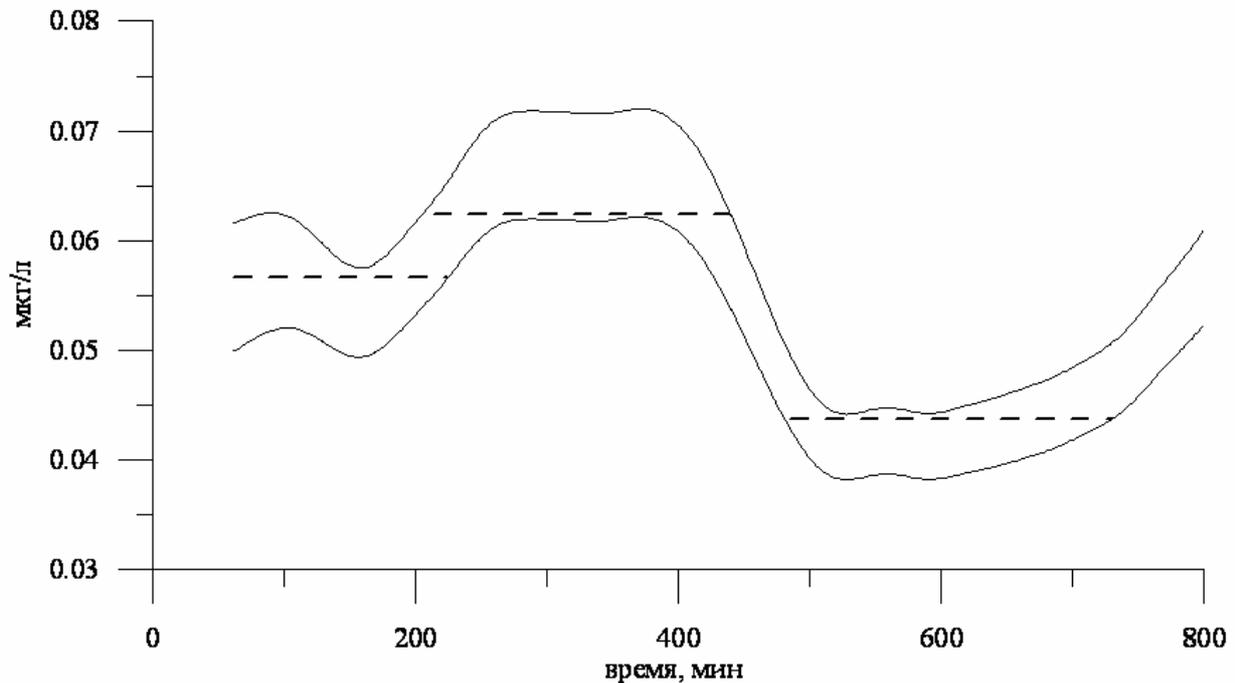


Рис. 1. Временной ход верхней и нижней границ доверительных интервалов среднеквадратичного отклонения концентрации хлорофилла «а» в скользящем окне 240 мин. и выделенные участки однородности (пунктир) в Восточно-Китайском море

Для надежной оценки самой корреляционной функции (КФ) и ее погрешности использовалась процедура скользящего контроля, в которой из исходной выборки данных на каждом участке однородности генерируется случайным образом несколько выборок размером 80-90 % от исходной. Аналогичная процедура использовалась при оценке пространственных спектров.

В ходе экспедиции выполнялись стандартные гидрологические станции, данные которых позволили оценить масштаб Россби R_d для верхнего квазиоднородного слоя океана (ВКС) по формуле $R_d = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{g \Delta \rho h}{\bar{\rho}}}$, где h – толщина ВКС, $\Delta \rho$ – разность между плотностями воды в ВКС и на нижней границе слоя скачка, $\bar{\rho}$ – их среднее значение [6].

Оценки характеристик пространственной изменчивости концентрации хлорофилла «а» по судовым данным, были сопоставлены с аналогичными оценками, полученными по данным 2 –го уровня спутникового сканера цвета морской поверхности Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) с разрешением ~4 км для тех же районов и временных интервалов [<http://seawifs.gsfc.nasa.gov>]. Однако, спутниковые данные полностью покрыли лишь 11 участков однородности.

Результаты

По судовым данным для всех участков однородности были рассчитаны гистограммы, корреляционные и структурные функции температуры воды, солёности и концентрации хлорофилла «а». Полученные оценки для последней сравнивались с аналогичными, полученными по данным SeaWiFS. На рис.2 в качестве примера приведены результаты для одного из районов Восточно-Китайского моря (34.35–34.59° с.ш. и 128.26–128.67° в.д., 2 февраля 2003 г.). Корреляционные

функции аппроксимировались функциями вида $Ae^{-r/L} \cos(Cr)$. Значения корреляционной или структурной функции в нуле дают оценку относительного уровня шума данных. Для данного примера судовые данные дают уровень шума 8 %, в то время как спутниковые – 33 %. Для различных регионов Мирового океана оценки уровня шума судовых данных варьируют от 0.8 до 20 %, а спутниковых – от 15 до 70 %. Гистограммы концентрации хлорофилла «а» показали, что в большинстве случаев спутниковые данные дают более низкие значения, по сравнению с данными ЛИФ.

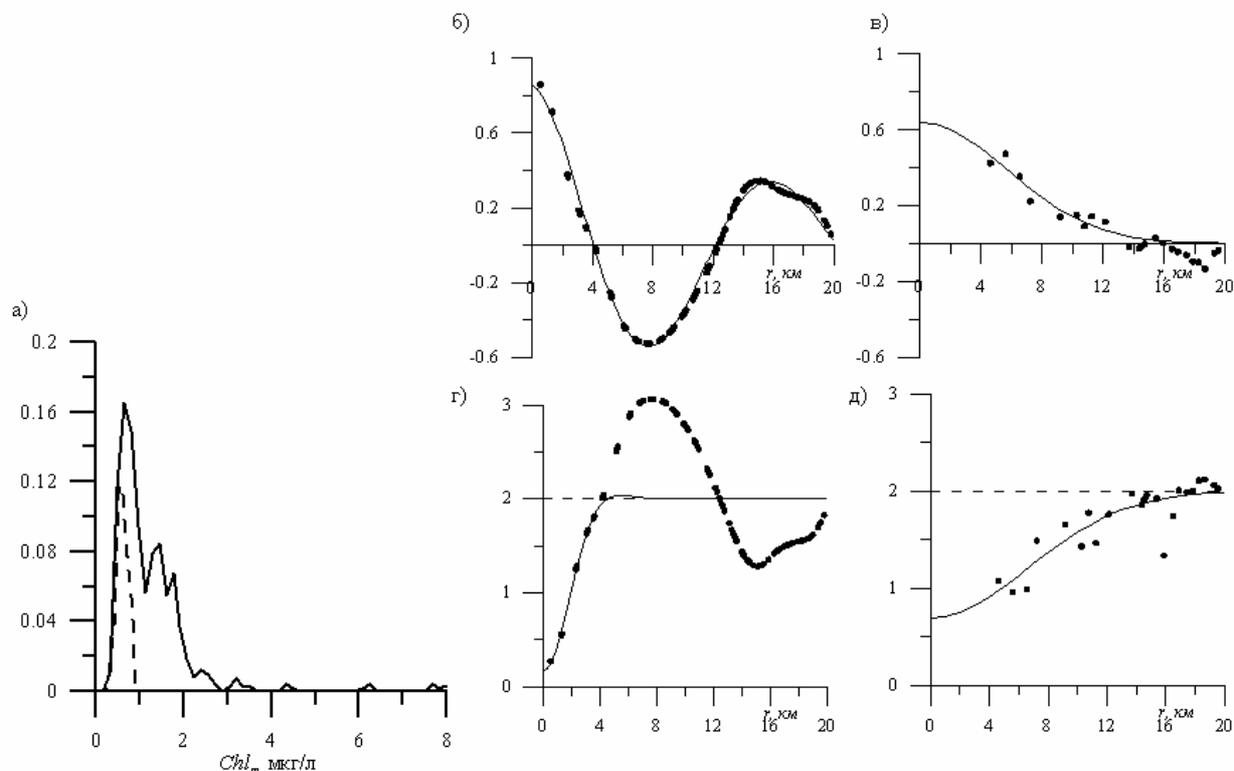


Рис. 2. Гистограммы, корреляционные и структурные функции концентрации хлорофилла «а» по судовым и спутниковым данным.

а) сплошная линия- SeaWiFS, пунктирная - судовые данные; б-д) точки - эмпирические значения корреляционных (б и в) и структурных (г и д) функций по судовым (б и г) и спутниковым (в и д) данным

В сводной таблице представлены оценки масштабов корреляции r (расстояние от максимального значения КФ и точкой первого пересечения нуля) и среднего размера периодичности L (расстояние до первого максимума в колебаниях КФ [7]) концентрации хлорофилла «а» Chl, температуры T и солёности S , полученные на выделенных участках в различных районах Мирового океана.

Таблица. Радиусы корреляции (r) и масштаба периодичности (L) полей концентрации хлорофилла «а» (Chl), температуры (T) и солёности (S) для различных районов Мирового океана

Район (кол-во участков однородности)	Chl		Т		S	
	r , км	L , км	r , км	L , км	r , км	L , км
Японское море (1)	2	5	8	30	8.5	20
Восточно-Китайское море (9)	2.2-4.5	8-17	5.8-20	10-42	4-8.5	15-35
Южно-Китайское море (4)	2-2.8	8-15	7-9	18-40	3.5-14	14-25
Бенгальский залив (6)	2-3.7	6-10	7.4-15	12-45	5-15	12-43
Аравийское море (6)	1.7-5	7-19	4.3-12.7	20-50	1.5-10	5-40
Красное море (7)	2.1-4	6-18	4.8-19	18-50	4.2-11	12-50

<i>Средиземное море(4)</i>	2-3.5	6-13	5.5-6	15-20	2-13	7-50
<i>Атлантический океан (22)</i>	1.7-4.3	5-22	4-16	8-50	3-10.5	8-40
<i>Северное море (3)</i>	2.5-3	10-18	4.5-5.8	12-27	4.5-5	12-25
<i>южная часть Тихого океана(3)</i>	1.7-3.5	6-20	4.5-11	11-37	3.5-8.2	10-30

Масштабы корреляции концентрации хлорофилла «а» вдоль маршрута судна изменялись в пределах от 1.7 до 5 км. Минимальные значения были получены в трех районах Мирового океана: в Индийском океане в зоне смешения вод Бенгальского залива и Аравийского моря (7.59–7.95° с.ш. и 75.26–75.66° в.д., 9 марта 2003 г.) [8]; в Тихом океане у побережья Чили (42.36–43.55° ю.ш. и 75.91–76° з.д., 7 декабря 2003 г.) в зоне смешения субарктических вод и вод восточной части субтропической структуры южного полушария [9]; в Атлантическом океане - вдоль побережья Южной Америки (34.48–34.92° ю.ш. и 50.31–50.5° з.д., 19-20 ноября 2003 г.) – в зоне смешения трех водных масс- тропического и субтропического типа Южной Атлантики и субарктического типа Атлантического океана [8]. Максимальное значение масштаба корреляции концентрации хлорофилла «а» 5 км было отмечено в Аденском заливе (20 марта 2003 г.).

Масштабы неоднородностей полей температуры воды больше и лежат в диапазоне 4–20 км. Минимальные их значения были получены в центральной части Атлантического океана в районе с координатами 11.54 – 12.57° с.ш. и 24.2–24.77° з.д., пройденного 28 октября 2003 г. Здесь находится зона смешения водных масс экваториального и тропического типа структуры. Наибольшие значения были получены в центральной части Красного моря (21.8-23.02° с.ш. и 37.82–38.09° в.д., 26 марта 2003 г.) и в Восточно-китайском море (25.44–26.09° с.ш. и 122.38–121.46° в.д., 6 февраля 2003 г.). Это отражает тот факт, что в районах интенсивных приливных и основных крупномасштабных течений масштабы корреляции, как правило, больше.

Величины масштабов корреляции солености лежат в пределах от 1.5 км до 15 км. Минимальные значения были получены в Аденском заливе. Наибольшая величина радиуса корреляции солености были получены в том же районе Индийского океана, что и минимум r_{Chl} , и в Южно-Китайском море (21.45–22.18° с.ш. и 118.05–118.56° в.д.). Этот участок был пройден 2 февраля 2003 г. и пришелся на область циклонического круговорота, образованного притоком воды с высокой соленостью из открытой части Тихого океана через проливы Баши и Тайваньский, возникающего зимой, и противотечения на восточной стороне Южно-Китайского моря.

Изменчивость в статистической структуре полей концентрации хлорофилла «а», температуры и солености четко проявляется в пространственных спектрах. Наличие пиков на тех или иных масштабах в ряде случаев позволяет дать им океанологическую интерпретацию и связать с ними определенные процессы. На рис.3 в качестве примера представлены спектры концентрации хлорофилла «а» и температуры воды для некоторых участков однородности в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах, Красном и Средиземном морях. В спектрах возмущений полей концентрации хлорофилла «а» можно выделить масштаб, соответствующий бароклинному радиусу Россби, определяющему характерные размеры синоптической изменчивости гидрологических характеристик ВКС. На рис.3-а показан спектр для участка Южно-Китайского моря (21,42 - 21,035° с.ш., 118,04 -117,74° в.д.). По данным гидрологических станций № 3 и 4, выполненных здесь 8-9 февраля 2003 г, масштаб Россби составил 28.8 км. На спектре он совпадает с максимумом на волновом числе $k=0.22$ и отмечен тонкой пунктирной линией. Спектр, представленный на рис.3-б, рассчитан для участка Атлантического океана с координатами 35.06-35.38° с.ш., 11.65 -12.92° з.д. Этот район интересен тем, что здесь находится подводная гора Ампер. Масштаб Россби 3.5 км ($k=1.8$). Как видно из рисунка, эта величина незначительно отличается от пика на масштабе 3.9 км (или $k=1.6$). По данным всех гидрологических станций, выполненных в Индийском океане, радиус Россби составил 25-37 км в Бенгальском заливе и 10-20 км в Аравийском море. Для Красного моря эти оценки варьируют от 5 до 24 км. На пример, в районе с координатами 16.47-16.94° с.ш. и 41.46 -40.27° в.д., по данным судовых измерений на станциях № 37 и 38 масштабы Россби составили 23.6 км и 20 км соответственно ($k=0.26$ и 0.3). На спектре концен-

трации хлорофилла «а» (рис.3-в) четко выделяется максимум на масштабе 22.4 км ($k=0.28$). На спектре концентрации хлорофилла «а» в Средиземном море (рис.3-г) максимум, отмеченный тонкой пунктирной линией совпадает со значением масштаба Россби 2.4 км ($k=2.6$), оцененным по данным станция № 44.

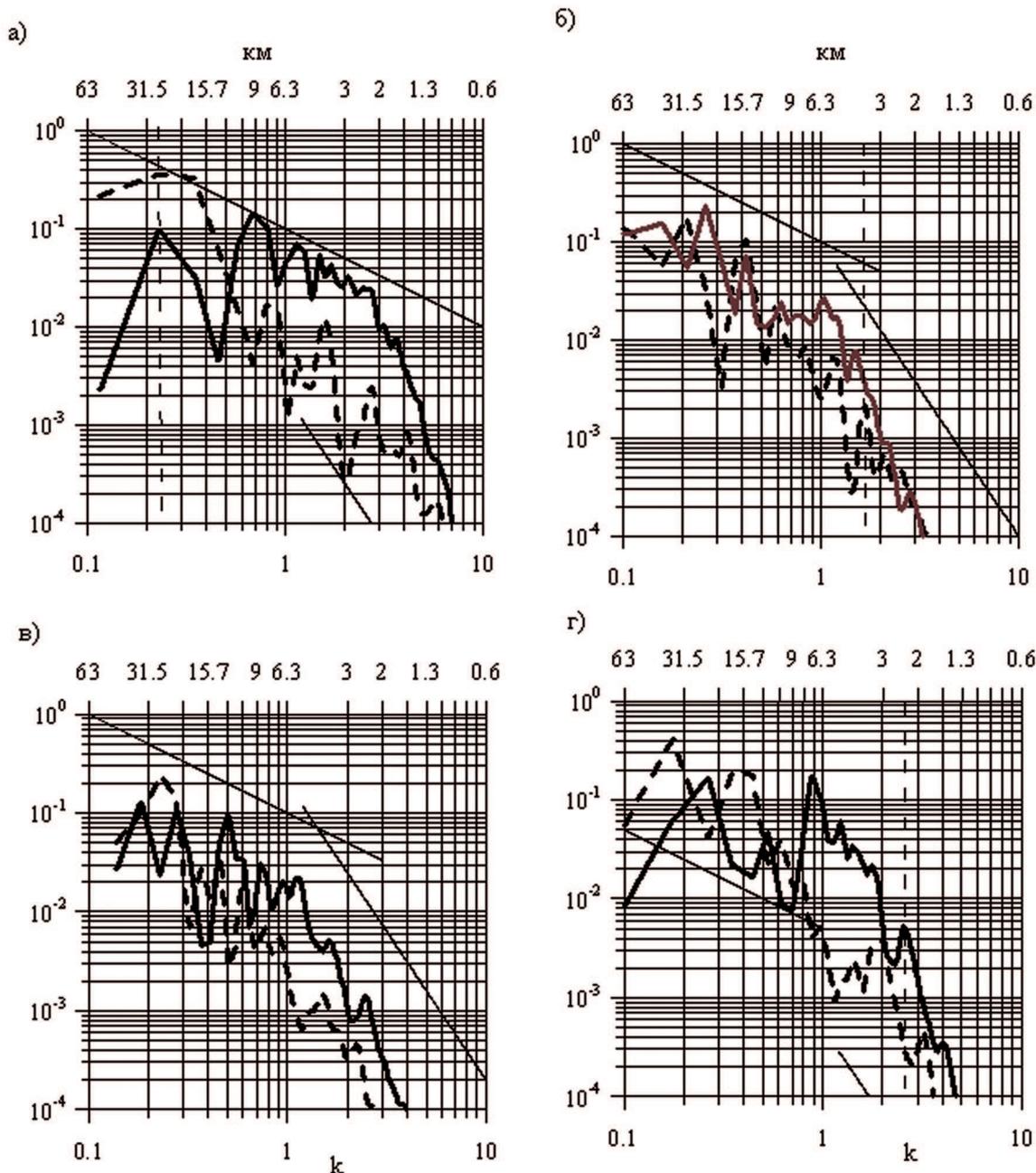


Рис. 3. Пространственные спектры концентрации хлорофилла «а» и температуры воды.

- а) Тихий океан (Южно-Китайское море), район- $21.42-21.035^{\circ}$ с.ш., $118.04-117.74^{\circ}$ в.д., 8-9 февраля 2003 г., станции № 3, 4: $Ro = 28.8$ км, $k=0.22$;
- б) Атлантический океан (Гора Ампер), район- $35.06-35.38^{\circ}$ с.ш., $11.65-12.92^{\circ}$ з.д., 20 апреля 2003 г., станция № 56: $Ro = 3.5$ км, $k=1.8$;
- в) Красное море, район- $16.47-16.94^{\circ}$ с.ш., $41.46-40.27^{\circ}$ в.д., 23 марта 2003 г., станция № 37: $Ro = 23.6$ км, $k=0.27$, станция № 38: $Ro = 20.1$ км, $k=0.3$;
- г) Средиземное море, район- $38.5-38.55^{\circ}$ с.ш., $1.32-2.09^{\circ}$ в.д., 11 апреля 2003 г., станция № 44: $Ro = 2.4$ км, $k=2.6$
- сплошная линия – спектр концентрации хлорофилла «а», пунктирная – температуры

На рис.3 тонкие линии соответствуют аналитическим спектрам $\sim k^{-1}$, который дает теория турбулентного переноса пассивного трассера в случайном волновом поле скоростей, и $\sim k^{-3}$, соответствующий механизму переноса бароклинно-инерционными гравитационными волнами [1].

Двумерные корреляционные функции полей концентрации хлорофилла «А» по данным SeaWiFS показывают их анизотропию, которая выражается параметрами и ориентацией корреляционных эллипсов и может отражать структуру течений. В качестве примера на рис.4 показаны корреляционные эллипсы на уровнях 0.7 и 0.5 для районов Тихого и Индийского океанов, Средиземного и Красного морей. Сравнение с картами течений для данного района, рассчитанными *Naval Research Laboratory* и предоставленными на сайте [http://www7320.nrlssc.navy.mil/global_ncom] пока

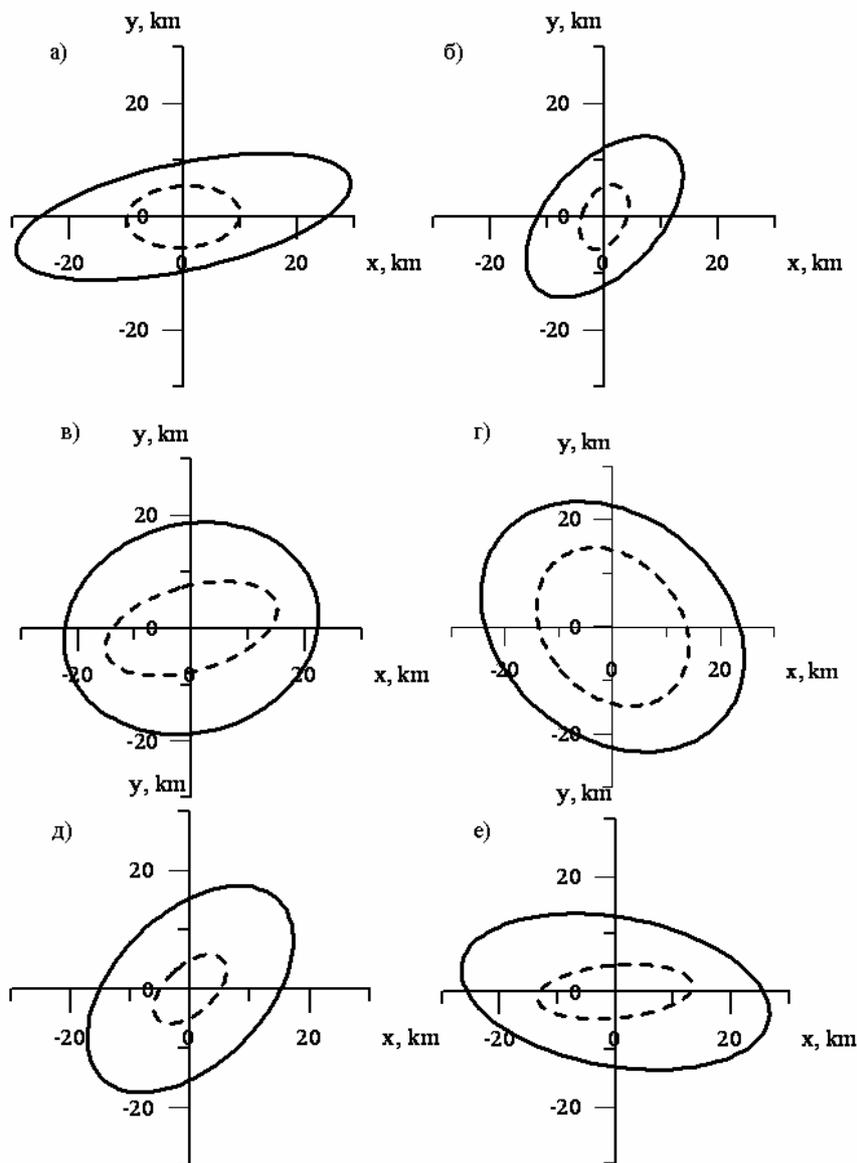


Рис. 4. Корреляционные эллипсы на уровнях 0.5 и 0.7

- а) Восточно-Китайское море, район-34.35–34.59° с.ш. и 128.26–128.67° в.д., 2 февраля 2003 г.;
- б) Восточно-Китайское море, район-34.05–34.36° с.ш. и 127.75–128.29° в.д., 2 февраля 2003 г.;
- в) Бенгальский залив, район -5.55-5.65° с.ш. и 91.91-92.56° в.д., 26 февраля 2003 г.;
- г) Аравийское море, район - 9.54-9.67° с.ш. и 65.69-66.3° в.д., 14-15 марта 2003 г.;
- д) Красное море, район - 20.29-21.04° с.ш. и 38.44-39.25° в.д., 25 марта 2003 г.;
- е) Средиземное море, район - 38.5-38.55° с.ш. и 1.32-2.09° в.д., 11 апреля 2003 г.

Сплошная линия – уровень 0.5, пунктир- 0.7

зывает, что ориентация эллипсов вполне отражает региональные особенности циркуляции вод - большие оси эллипсов направлены вдоль основных течений, а степень анизотропии обуславливается их интенсивностью и влиянием мелкомасштабных динамических процессов. Наиболее ярко анизотропия проявилась в зоне течения Куроисио в Восточно-Китайском море (рис.4-а). Величина большой оси эллипса (на уровне 0.5) в 6 раз больше малой. В наименьшей степени анизотропия проявилась в открытых районах Индийского океана, отношение большой оси эллипса к малой лежит в диапазоне 1.2-1.4, что объясняется слабостью или отсутствием здесь интенсивных устойчивых течений в период измерений (рис.4-в,г). Полученные оценки важны для определения масштабов турбулентности, в случае анизотропии поля корреляционные эллипсы определяют «эллипсоид масштабов» и направление турбулентного переноса [10].

Заключение

Показано, что минимальные значения масштабов корреляции концентрации хлорофилла «а» около 1.7 км приходятся на зоны смешения вод различных структур. В районах интенсивных приливных и основных крупномасштабных течений масштабы корреляции температуры воды, как правило, больше. Анизотропия случайных полей концентрации хлорофилла «а» отражает региональные особенности циркуляции вод.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК – 977.2006.5

Литература

1. *Weichman P.B., Glazman R.E.* Spatial variations of passive tracer in a random wave field // *J. Fluid. Mech*, 2002. V.453. P. 263-287.
2. *Нелепо Б.А., Терехин Ю.В., Коснырев В.К., Хмыров Б.Е.* Спутниковая гидрофизика // М.: Наука, 1983. 263 с.
3. *Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А., Майор А.Ю., Буров Д.В., Хованец В.А., Голик С.С., Подопригора Е. Л.* Особенности формирования спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в период цветения водорослей в различных районах Мирового океана // *Оптика атмосферы и океана*, 2004. № 9. С. 742-749.
4. *Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н.* Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // *Оптика атмосферы и океана*, 2005. Т. 18, № 11. С. 976-983.
5. *Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Заикин В.М.* Автоматизация гидрофизического эксперимента // Л.: Гидрометеиздат, 1982. 224 с.
6. *Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане // Л.: Гидрометеиздат, 1982. 510 с.
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. // Москва: «Наука». 1 ч. – 1965. 640 с, 2 ч. – 1967. 720 с.
8. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны // Министерство обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1977. 354 с.
9. Атлас океанов. Тихий океан // Министерство обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1974. 327 с.
10. *Кочергин В.П., Тимченко И.Е.* Мониторинг гидрофизических полей океана // Л.: Гидрометеиздат, 1987. 279 с.