

УДК 551.465

## СИНОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

© 2015 г. А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь  
e-mail: arskubr@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2013 г., после доработки 08.11.2013 г.

Для исследования синоптической вихревой динамики Черного моря используется метод автоматической идентификации вихревых структур, основанный на определении замкнутых линий тока в поле аномалий скорости течений, восстановленных по данным спутниковой альтиметрии. С помощью данного метода за период с 1992 по 2011 г. было идентифицировано более 800 вихрей различного знака с временем жизни более 4 недель и диаметром более 40 км. В работе, используя полученный массив данных, проводится анализ количества и продолжительности существования вихревых структур, их кинематических и геометрических характеристик, уточнены районы преимущественного возникновения и исчезновения вихрей, выявлены характерные траектории и скорости их перемещения, проанализирована изменчивость различных характеристик вихря как функция его “возраста”.

DOI: 10.7868/S0030157415010104

Синоптические вихри являются важнейшими элементами динамической структуры черноморского бассейна [1–7, 15, 16, 25, 27, 28, 30 и др.]. Большое количество работ посвящено исследованиям структуры и динамики отдельных вихрей по данным гидрологических зондирований [1, 3, 6, 7, 8, 21, 30 и др.], а также изучению характеристик вихрей, их траекторий перемещения, проявлений вихревых структур в полях температурных и оптических контрастов по спутниковым изображениям в инфракрасном (ИК) и оптическом диапазонах [1, 2, 5, 15, 16, 28 и др.].

Контактные методы имеют ряд несомненных достоинств: они позволяют получить информацию о трехмерной структуре вихрей в полях различных параметров. Недостаток контактных методов связан с нерегулярностью измерений и невозможностью проводить квазисинхронные измерения на обширной акватории; судовые наблюдения способны в лучшем случае дать информацию об эволюции 2–3 вихрей за незначительный промежуток времени в течение одного рейса. Спутниковые изображения в ИК- и оптическом диапазонах спектра характеризуются более высоким пространственным и временным разрешением. Однако, облачность препятствует получению регулярной спутниковой информации о вихревых образованиях по таким измерениям. Кроме того, не все вихри обнаруживаются в полях температурных или оптических контрастов.

В этих условиях для систематического исследования вихрей значительное преимущество име-

ют спутниковые альтиметрические измерения. Спутниковые альтиметры с 1992 г. проводят высокоточные (с точностью до 2 см) измерения топографии уровенной поверхности Мирового океана [14]. Эти данные доступны регулярно, т.к. для сигнала в микроволновом диапазоне облака являются прозрачными, и охватывают всю поверхность черноморского бассейна. Кроме того, альтиметрические измерения позволяют непосредственно определить динамическую структуру вихревого образования в поле уровня, в отличие от измерений в оптических и ИК-каналах, которые позволяют получить лишь изображение вихря в поле трассеров. Комбинирование вдольтрековых измерений, полученных с альтиметров нескольких спутников с помощью методов, развитых в работах [19, 23] позволяет восстанавливать карты аномалий уровенной поверхности.

Исследование синоптических вихрей в Черном море с применением данных спутниковой альтиметрии проводилось ранее в работах [18, 27, 30]. Однако в этих работах авторы проводили анализ, детектируя вихри визуально; таким образом были получены преимущественно качественные результаты.

После появления массива картированных альтиметрических измерений начинается бурное развитие методов автоматической идентификации вихрей по данным о поле уровня [10, 17]. Эти методы позволяют автоматически по заданным критериям идентифицировать каждый индивидуальный вихрь, проявляющийся в альтиметрических

данных, за исследуемый период и далее исследовать как особенности эволюции индивидуального вихревого образования, так и статистические свойства всего ансамбля вихрей в регионе в целом. В настоящей работе проводится анализ количества вихревых структур зарегистрированных за период 1992–2011 гг. их пространственного распределения и времени существования, кинематических и геометрических характеристик, траекторий и скоростей перемещения. Анализируется эволюция различных характеристик вихря в зависимости от времени его существования.

## ДАННЫЕ

**Спутниковая альтиметрия.** В работе использовался региональный массив картированных аномалий уровня AVISO (Archive Validation Interpretation des données des Satellites Océanographiques) для Черного моря (<http://www.aviso.oceanobs.com/>) с 1992 по 2011 г. Региональный массив был создан в агентстве CLS (Collection and Location by Satellite). Пространственное разрешение карт составляет  $1/8^\circ$  ( $\sim 12.5$  км), что в два раза выше, чем для глобального массива данных ( $1/4^\circ$ ); временное разрешение – 7 дней (delayed-time product). Картированные данные были получены по комбинированным измерениям вдольтрековых аномалий уровня с нескольких спутников с помощью методов, предложенных в [19, 23]. Поля аномалий геострофической скорости были рассчитаны по картам аномалии уровня из уравнений геострофического баланса:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x},$$

где  $u_g, v_g$  – зональная и меридиональная составляющая геострофической скорости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – параметр Кориолиса,  $h$  – аномалия уровня моря.

Следует отметить, что в ряде работ показано, что алгоритм картирования альтиметрических данных, который проводится с применением процедуры оптимальной интерполяции, приводит к определенному сглаживанию полей уровня и занижению орбитальных скоростей в синоптических вихрях. Можно ожидать, что коэффициент занижения будет максимален ( $\sim 1.5$ ) для небольших вихрей с радиусом  $\sim 20$  км, и близок к единице в крупных вихрях с радиусом более 50 км [11].

**Температура морской поверхности.** В работе использовались данные о температуре поверхности, полученные по измерениям радиометров Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) с пространственным разрешением 1 км в отделе дистанционного зондирования Морского гидрофизического института (<http://dvs.net.ua/>).

## МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПО АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

В настоящей работе в основе алгоритма автоматической идентификации вихревых структур по альтиметрическим измерениям использовался метод “угол намотки” (“winding angle” – англ.). Этот метод, предложенный в работе [24], основан на выделении зон акватории, ограниченных замкнутыми линиями тока. Впервые он был успешно использован для автоматического выделения синоптических вихрей по данным спутниковой альтиметрии в работе [10] и далее применялся в нескольких работах (см. например [12]). Как показано в [10, 26], использование данного метода для идентификации вихрей предпочтительнее, чем по критическому параметру Окубо-Вяйса [22, 29], широко применяемого в метеорологии для выделения атмосферных вихрей по полю давления, поскольку последний может приводить к появлению большого количества ложных вихрей.

Наиболее часто (за редким исключением [1, 30]) синоптические вихри наблюдаются в зоне Основного черноморского течения (ОЧТ). Такие вихри не обязательно будут характеризоваться замкнутыми линиями тока, вследствие чего идентификация вихрей по полям полной скорости течений затруднена. Поэтому в настоящей работе используются поля аномалий скорости, восстановленные по альтиметрическим аномалиям уровня. Такой подход, стандартно применяемый и в других районах Мирового океана приводит, однако, к тому, что меандры ОЧТ также идентифицируются как вихревые образования. Следует сказать, что четкого разделения на меандры и вихри в зоне ОЧТ не существует, в большинстве работ эти понятия перекликаются. Например, согласно распространённой точке зрения, вихри возникают из меандров ОЧТ, причем однозначный переход от одного понятия к другому не описан [18].

Автоматическая идентификация вихревых структур с помощью метода “угол намотки” проходит в три этапа. Первый этап заключается в идентификации узлов сетки, которые находятся в зоне вихря. Для этого в каждом узле сетки запускается виртуальная частица, траектория которой рассчитывается по численной схеме Эйлера:

$$r_{n+1}(x, y, t) = r_n(x, y, t - 1) + v'(x, y)dt,$$

здесь  $r$  – радиус-вектор частицы,  $v'(x, y)$  – стационарное во времени поле аномалии геострофической скорости за конкретную дату,  $dt$  – шаг по времени. На каждом шаге работы алгоритма рассчитывается суммарный угол отклонения частицы, собственно “угол намотки”. Превышение суммарным углом величины  $360^\circ$  означает, что частица совершила круговой оборот и находится на замкну-

той линии тока, т.е. соответствующий узел сетки находится в вихревом образовании.

Следующий шаг алгоритма состоит в разделении найденных областей на индивидуальные вихри. Идентифицированные узлы сетки в простейшем случае представляли собой отдельные кластеры, соответствующие индивидуальным вихрям. В более сложных ситуациях один кластер частиц мог соответствовать нескольким вихрям различных знаков. Для отделения циклонов от антициклонов частицы с разными знаками рассчитанной завихренности течений разделялись. Для разделения нескольких вихрей одного знака использовался следующий метод: для каждой частицы определялся центр траектории, примерно соответствующий центру вихря. Далее проводилась процедура кластеризации по центрам траекторий. Частицы, обращающиеся вокруг двух различных кластеров центров, соответствовали разным вихрям. Последние ситуации наблюдались нередко, т.е. идентифицировался антициклон с двумя ядрами, окруженный общей ячейкой циркуляции.

Третий этап: после того как вихревые образования выделены, проводится процедура определения траекторий отдельных вихрей. Для нахождения двух последовательных положений одного и того же вихря рассчитывается расстояние между центром вихря за данную дату и на следующий момент времени (через 7 дней). Двум последовательным положениям вихря соответствует минимальное смещение центра, если оно не превышает 100 км. Максимально возможное смещение вихря было выбрано эмпирически, т.е. скорость перемещения центра вихря была заведомо ограничена величиной  $100 \text{ км}/7 \text{ дней} \sim 0.16 \text{ м/с}$ .

В результате процедуры автоматической идентификации для каждого найденного вихря были определены следующие параметры: радиус  $R = \sqrt{S/\pi}$  (где  $S$  — площадь вихря, определенная как количество узлов в вихре, умноженное на площадь бокса), средняя  $\langle V \rangle$  и максимальная орбитальная скорость  $V_{\max}$  частиц в вихре, скорость перемещения центра вихря  $V_c$ , средняя завихренность  $\langle W \rangle$ . Кроме того, все вихри были аппроксимированы эллипсами, и для них определялись эксцентриситет  $ecc$ , угол отклонения большой полуоси от оси абсцисс  $a$ , угловая скорость поворота большой полуоси эллипса  $W_{ell}$ .

### АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

Для апробации данного метода идентификации вихрей в Черном море полученные карты распределения вихрей сопоставлялись с изображениями, полученными по данным ИК- и оптических сканеров. Температура и взвешенное вещество на этих снимках выступают в роли трассеров, распределение которых дает возможность

идентифицировать вихри. Сравнение показало, что использованный алгоритм позволяет достаточно хорошо выделять вихревые структуры по альтиметрическим данным. Пример такого сравнения проанализирован ниже.

Сложная картина вихревой динамики видна на карте поверхностной температуры, полученной по измерениям прибора AVHRR (рис. 1а). Мощная вихревая пара циклон-антициклон находится в юго-восточной части бассейна, причем интенсивный циклон располагается на месте, где, согласно, классической схеме циркуляции располагается так называемый «Батумский антициклон» [21]. На месте центра восточного циклонического круговорота располагается антициклон, который ранее находился на месте Батумского антициклона и в процессе эволюции трансформировался, фактически, в вихрь открытого моря. Кроме этого, еще несколько присоединенных циклонических образований видны на спутниковой карте температуры поверхности моря.

Все вышеуказанные вихревые образования были успешно идентифицированы по данным спутниковой альтиметрии с помощью использованного метода (рис. 1б), что иллюстрирует его пригодность для изучения синоптической динамики бассейна.

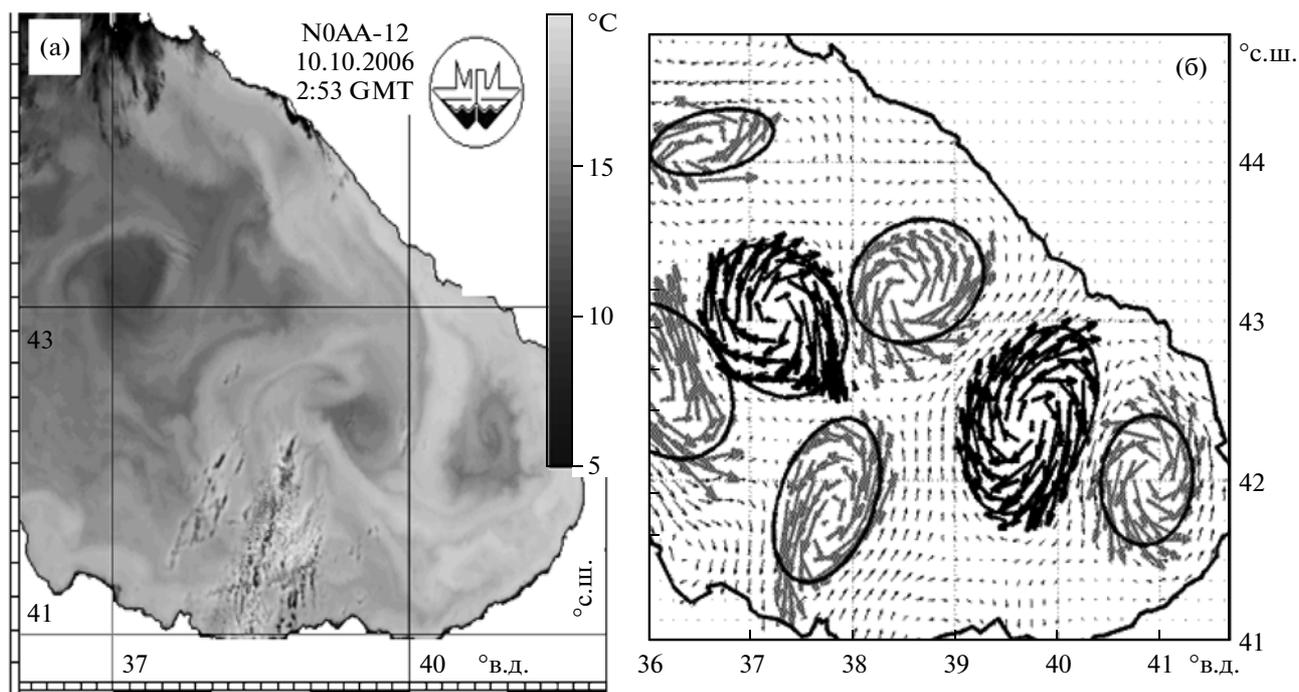
### ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

**Количество вихрей и время их жизни.** Поскольку пространственное разрешение полей аномалий уровня составляет  $\sim 12.5 \text{ км}$ , а из-за процедуры картирования могут появляться единичные ложные вихри, в настоящей работе для минимизации возможных ошибок исследовались только вихри с временем жизни более 4 недель и диаметром более 40 км.

За период времени с 1992 по 2011 гг., приблизительно на 990 картах аномалий уровня моря было идентифицировано более 9000 вихревых структур, что соответствовало 847 индивидуальным вихрям (один и тот же вихрь идентифицировался в среднем порядка 10 раз).

Было идентифицировано достаточно большое количество долгоживущих вихрей: 50 обнаруженных вихрей просуществовали более полугода, из них 14 — наблюдались более чем 9 месяцев, а 4 антициклона — более одного года. Распределение количества вихрей в зависимости от продолжительности их жизни представлено на рис. 2а и 2б.

Установлено, что чем больше время жизни вихря, тем реже он наблюдается, причем эта зависимость имеет логарифмический характер (рис. 2б), в согласии с работами [10, 11, 12] для других районов Мирового океана.



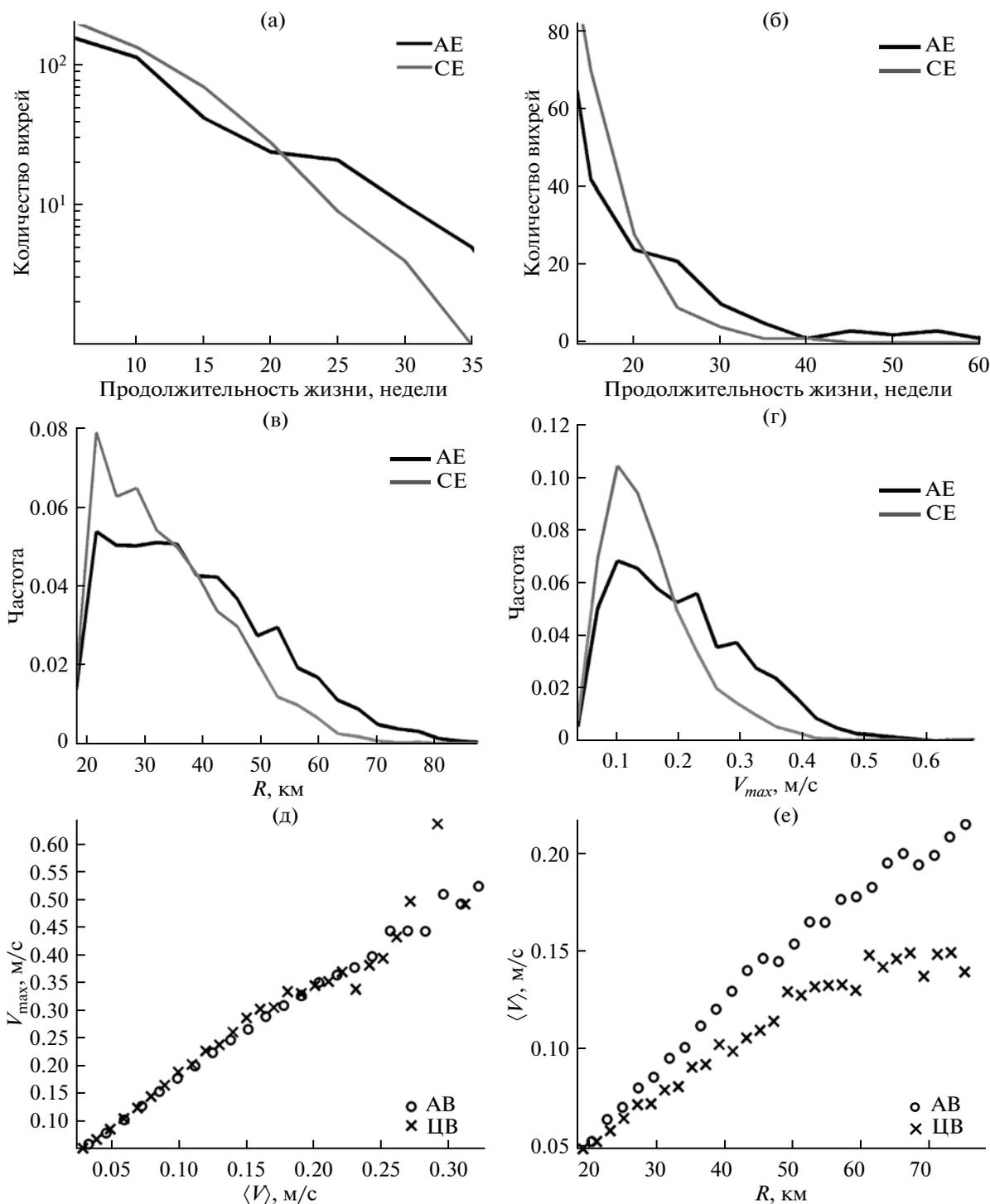
**Рис. 1.** (а) Температура морской поверхности за 10.10.2006 г. по данным AVHRR, (б) карта с вихрями за 08.11.2006 г., идентифицированными по данным спутниковой альтиметрии (черным цветом — антициклоны; серым — циклоны; сплошными линиями нанесены аппроксимирующие эллипсы).

Количество идентифицированных антициклонических вихрей (АВ) — 387 оказалось меньшим, чем циклонических (ЦВ) — 460. Этот результат сам по себе является достаточно интересным, поскольку в Черном море основное внимание исследователей исторически сосредоточено в основном на вихрях антициклонического знака.

Из рис. 2а, 2б видно, что антициклоны в среднем живут дольше, чем циклоны, что подтверждает выводы, полученные по данным гидрологических зондирований в работе [7]. Зафиксировано большее количество вихрей с временем жизни менее 24 недель (или полугод) циклонического знака, чем антициклонов с такими характеристиками (448 циклонов и 349 антициклона). В то же время долгоживущих АВ больше, чем долгоживущих циклонов — наблюдалось 12 циклонов и 38 антициклонов с временем жизни более полугод. Наблюдаемые в Черном море циклоны часто присоединены к более крупному антициклону, причем число более мелких циклонов может меняться в процессе эволюции АВ [30]. Относительно малое время жизни циклонов по сравнению с антициклонами было зафиксировано по данным альтиметрии и в других районах Мирового океана [11, 12]. Подобная асимметрия в работах [13, 20] связывается с различием в локальных радиусах деформации Россби в циклонах и антициклонах в сравнении с типичными значениями радиуса Россби вне вихрей.

**Размеры и кинематические характеристики вихрей.** Распределения значений радиусов  $R$  вихрей и максимальных орбитальных скоростей  $V_{\max}$  относительно частоты их повторяемости изображены на рис. 2в и 2г. Средняя и максимальная скорости перемещения частиц в вихре коррелируют друг с другом с коэффициентом 0.95 (см. рис. 2д), т.е. характер изменчивости обеих величин практически одинаков и  $\langle V \rangle \sim V_{\max}$ . Поэтому здесь для большей наглядности результатов анализ проводится для максимальной орбитальной скорости частиц.

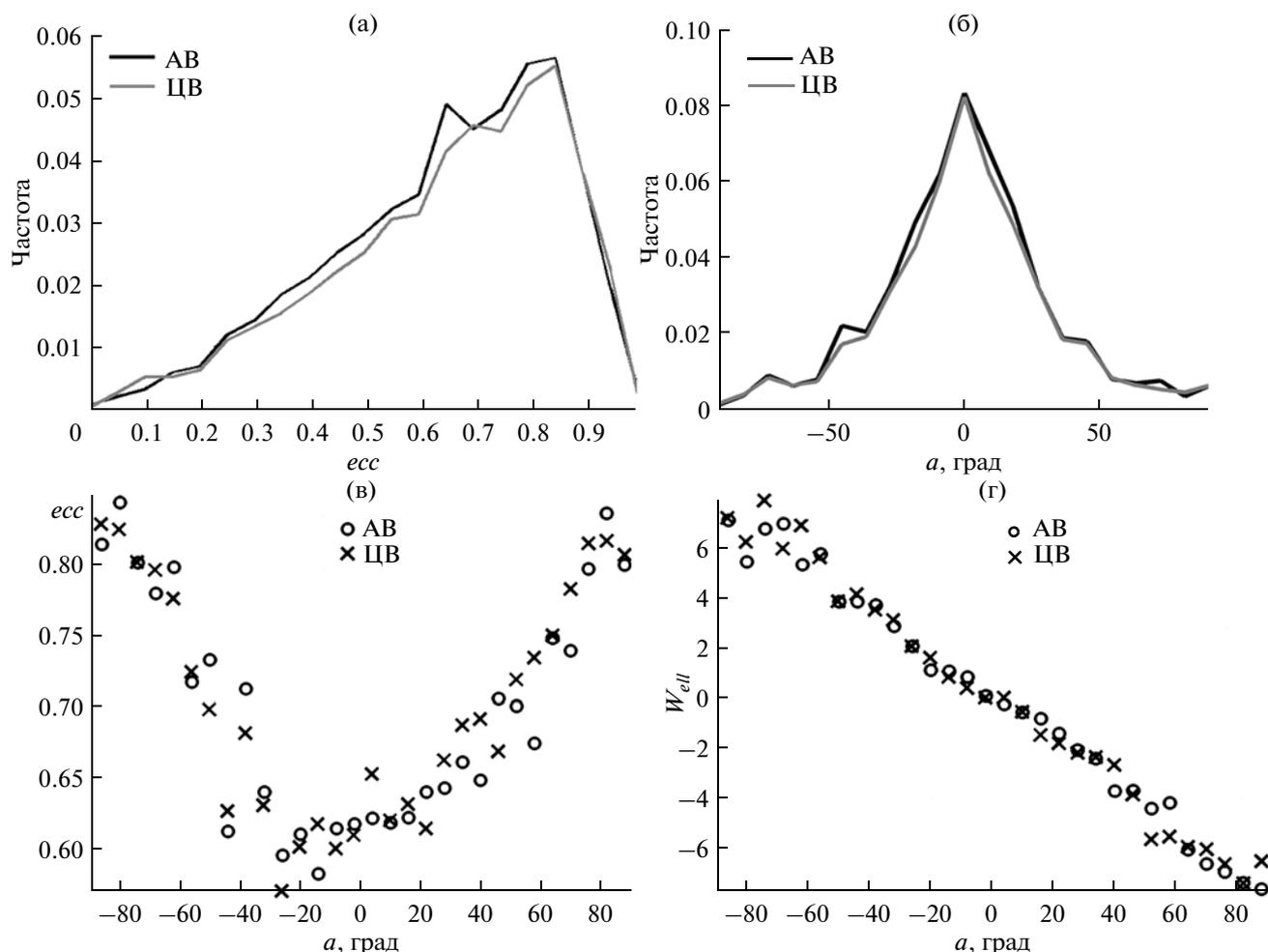
Вид функций плотности вероятности для обоих параметров близок к логнормальному. Антициклонические вихри характеризуются как большим размером, так и большими орбитальными скоростями по сравнению с циклоническими, что объясняет более частое их обнаружение при проведении натурных исследований. Действительно, вероятность обнаружить антициклон с радиусом более 40 км и орбитальными скоростями более 25 м/с значительно выше, чем циклон с такими же характеристиками. Узкий пик максимальной вероятности для значений радиуса циклонов приходится примерно на 25 км (шанс обнаружить циклон с радиусом 25 км среди вихрей обоих знаков составляет ~8%), для антициклонов этот пик шире и приходится на значения 25–40 км. Максимальные значения радиуса идентифицированных вихрей ограничены величинами 80–90 км. Наиболее часто наблюдаются циклоны с макси-



**Рис. 2.** Распределение количества циклонов (ЦВ) и антициклонов (АВ) в зависимости от продолжительности их жизни в логарифмическом (а) и линейном (б) масштабах. Распределения плотности вероятности радиуса вихря (км) (в) и максимальной орбитальной скорости частиц (м/с) (г), зависимости между  $V_{max}$  и  $\langle V \rangle$  (д) и между  $R$  и  $V_{max}$  в вихре (е).

мальными орбитальными скоростями  $\sim 10$  см/с, для антициклонов пик вероятности находится в интервале 10–25 см/с. Заметно, что существует сходство между распределениями значений радиуса вихря и орбитальной скорости. Анализ пока-

зывает, что это сходство связано с тем, что орбитальная скорости в вихре прямо пропорциональна его радиусу с коэффициентом взаимной корреляции, равным 0.75 (см. рис. 2е). Таким образом, вихри больших размеров в Черном море в основ-



**Рис. 3.** Распределения плотности вероятности эксцентриситета (а) и угла наклона большой полуоси эллипса относительно положительного направления оси абсцисс ( $^{\circ}$ ) (б), зависимость между  $ecc$  и  $a$  (в), зависимость между  $W_{ell}$  и  $a$  (г).

ном характеризуются большими орбитальными скоростями.

**Форма вихрей.** Вихревые структуры были аппроксимированы эллипсами с помощью процедуры `regionprops`, описанной в среде `Mallab`. Процедура основана на определении главных моментов инерции и эллипса инерции данной области (термины из теории сопротивления материалов). Аппроксимирующие эллипсы для наглядности были нанесены на рис. 1б. В большинстве случаев вихри имеют эллиптическую форму. Максимально вероятный эксцентриситет составляет 0.8, т.е. отношение малой к большой полуоси – 0.6 (рис. 3а).

Эллипсы преимущественно ориентированы в зональном направлении, поскольку наблюдаемые углы наклона большой полуоси сосредоточены возле  $0^{\circ}$  (рис. 3б). Как демонстрирует рис. 3в, существует определенная зависимость между величиной и направлением “вытянутости” вихря. Наибольший эксцентриситет 0.85, т.е. наименьшее отношение малой к большой полуоси

$\sim 0.5$ , наблюдается в вихрях, вытянутых в меридиональном направлении (большие углы наклона большой полуоси). Вихри, вытянутые в зональном направлении, имеют форму, близкую к круговой:  $ecc = 0.62$  (отношение малой к большой полуоси  $\sim 0.78$ ). Минимальный эксцентриситет  $ecc = 0.55$  (отношение малой к большой полуоси  $\sim 0.83$ ) наблюдаются при углах наклона от  $-25^{\circ}$  до  $-15^{\circ}$ , т.е. эллипсы незначительно вытянуты в северо-западном или юго-восточном направлениях. Также анализ показывает, что вихри, вытянутые в зональном направлении, имеют более высокие значения кинетической энергии по сравнению с другими направлениями.

Кроме того, из рис. 3г видно, что существует зависимость между угловой скоростью большой полуоси эллипса и ее наклоном: при положительных значениях угла скорость  $W_{ell}$  отрицательна, а при отрицательных – положительна. Это значит, что вихрь стремится к тому, чтобы уменьшить угол наклона большой полуоси относительно оси

абсцисс и вытянуться в зональном направлении. Таким образом, результаты этого анализа показывают, что существует определенная асимметрия — вихри вытянутые в меридиональном направлении больше “сплющены” и имеют тенденцию к повороту большой полуоси эллипса до выравнивания в широтном направлении и приобретения круговой формы, для которой их средняя кинетическая энергия максимальна. Полученный результат требует дальнейшей проверки и подробного исследования, поскольку процедура картирования альтиметрических данных может приводить к искажению формы вихрей.

### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ И ТРАЕКТОРИИ ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

#### Места образования и траектории перемещения.

С помощью использованного метода были определены траектории перемещения всех идентифицированных вихрей. Поскольку рисунок со всеми траекториями на одном графике будет перепреэзентативен, на рис. 4а изображены пути перемещения центров только долгоживущих вихрей — с временем жизни более 30 недель. Кружками на графике отмечены места преимущественного образования вихрей, крестиками — места их исчезновения, сплошными линиями — траектории. Используя эту карту, можно выделить несколько основных путей перемещения долгоживущих образований, рассмотренных подробно на примере отдельных вихрей на рис. 4б:

1) Вихри, образованные за Крымским полуостровом в западной части бассейна (квадрат 1 на рис. 4). Они движутся на юго-запад вдоль континентального склона и большинство из них разрушается в юго-западной части бассейна к северу от пролива Босфор. Их траектории преимущественно направлены параллельно изобатам, за исключением участка, выделенного кругом (рис. 4б). В этой области с координатами ( $44^\circ$  с.ш.,  $32^\circ$  з.д.) вихри временно приостанавливают свое движение по направлению струи ОЧТ, совершая круговое движение в циклоническом направлении внутри данной области. Эти результаты согласуются с результатами предыдущих исследований, полученными по инфракрасным и оптическим спутниковым изображениям [2, 16], в которых указывается на существование данного района замедления движения вихрей с характерной топографической особенностью (сужение материкового склона и следующий за ним подводный хребет) [2].

2) Вихри, образованные в юго-восточной части бассейна в районе Батумского антициклона (квадрат 1 на рис. 4). Можно выделить два типа траекторий этих образований.

Первый тип (2а) — вихрь является относительно стационарным, т.е. долгое время находится в юго-восточной зоне, незначительно смещаясь, часто по кругу в циклоническом направлении.

Второй тип (2б) — вихри, долгое время находившиеся в данном районе, выходят из этой зоны и, двигаясь в северо-западном направлении, становятся вихрями открытого моря. Согласно проведенному анализу, именно такие образования являются наиболее долгоживущими в черноморском бассейне. Процесс “отрыва” Батумского антициклона и трансформации его в вихрь открытого моря представляется довольно интересным явлением, требующим дальнейших исследований.

3) Вихри, образующиеся в восточной части бассейна, в районе Геленджика, Туапсе или южнее в районе Сочи (квадрат 1 на рис. 4). Эти образования двигаются в северо-западном направлении вдоль континентального склона, исчезая в районе южного и юго-восточного побережья полуострова Крым, который является своего рода преградой для дальнейшего продвижения вихрей на запад. Отметим, что для этой группы вихрей также существует область стационарирования с координатами ( $44^\circ$  с.ш.,  $36^\circ$  в.д.) (рис. 4б). Эти вихри исследовались в работах [15 и др.].

Необходимо также отметить практически полное отсутствие долгоживущих вихревых образований в южной части акватории бассейна. Как известно из ряда работ, вихри, образующиеся здесь, по ряду свойств отличаются от других черноморских вихрей, что, возможно, связано с волновой природой их возникновения [9]. Вышеотмеченные особенности траекторий являются характерными, но не обязательными, т.е. траектории отдельных, в том числе и долгоживущих, вихрей могут отклоняться от указанных путей перемещения, при этом могут двигаться без стационарирования или разрушения в указанных зонах (см. обзор в [1]). Вихри со временем жизни менее 25 недель (и более 5 недель), согласно проведенному анализу, могут образовываться практически в любом месте акватории. Еще один замеченный факт — траектории передвижения циклонов обычно сложнее, чем антициклонов.

**Пространственное распределение.** Распределение количества дней в году, в которых в данной точке наблюдается циклон или антициклон, приведено на рис. 5а и 5б. Выделяются два наиболее значительных максимума в северо-западной и в юго-восточной частях бассейна и менее интенсивный — в северо-восточной части моря. Область первого максимума находится на северо-западе бассейна с центром с координатами ( $44^\circ$  с.ш.,  $32^\circ$  в.д.). Здесь антициклоны наблюдаются в среднем ~90 дней в году; циклоны ~ 100 дней в году. В юго-восточной части бассейна антициклоны существуют примерно 90 дней в году, циклоны — 70 дней в го-

ду; в северо-восточной области циклоны — 40 дней/год, антициклоны — 50 дней/год. Еще один максимум активности (~40 дней/год), характерный только для антициклонов, находится в южной части моря с координатами ( $42^\circ$  с.ш,  $36^\circ$  в.д.).

Существование этих локальных максимумов совпадает с местами стационарирования синоптических вихрей в указанных районах (см. предыдущий пункт). Т.е. замедление движения вихревых образований приводит к возникновению областей максимальной синоптической активности.

Возможное объяснение замедления движения вихрей в этих районах связано с влиянием рельефа дна. Для анализа на приведенные карты распределения на рис. 5а и 5б были нанесены изобаты (черные линии). В области, соответствующей северо-западному максимуму распределения, топография дна имеет выраженную особенность (см. выше). Такая особенность рельефа дна может выступать в роли топографической “ловушки”, сдерживающей перемещение вихря, пока он либо достаточно интенсивен, либо прижат к континентальному склону струей ОЧТ. Аналогичные соображения о роли рельефа дна приводятся в [16, 27]. В пользу этой гипотезы также свидетельствует существование аналогичных топографических особенностей в других районах максимумов синоптической активности. Действительно, максимумы в северо-восточной части возле Керченского пролива и южной части у Турецкого побережья также находятся перед аналогичными хребтами.

Большое количество вихревых образований наблюдается вдоль континентального склона в западной и восточных частях моря (примерно 20–50 дней в году), что связано с прохождением вихрей в зоне ОЧТ в этих районах. Относительно немного долгоживущих вихрей наблюдается в южной части бассейна. Как уже говорилось выше, синоптические образования вблизи побережья Турции значимо отличаются по характеру поведения от образований в других частях бассейна. Поскольку они имеют относительно небольшие продолжительность жизни и размер и к тому же сильно прижаты к берегу, алгоритм идентификации с предложенными ограничениями (время жизни более 5 недель и радиус более 20 км) не приспособлен для их выделения.

Отметим схожесть пространственного распределения для циклонических и антициклонических вихрей. В Черном море часто наблюдаются плотно упакованные вихревые структуры, состоящие из нескольких вихрей различного знака, на-

пример, мощного антициклона и присоединенных к нему менее интенсивных циклонов [16, 30]. Еще одной причиной схожего распределения вихрей различного знака является сезонная изменчивость: летом преобладают антициклонические вихри, поздней осенью и ранней зимой — циклонические.

**Скорость перемещения вихря.** Поле средних скоростей перемещения вихрей представлено на рис. 5в. В основном вихри двигаются вдоль ОЧТ в циклоническом направлении. В области распространения ОЧТ средние скорости составляют ~0.02–0.03 м/с, кроме южной части, где скорости вихревых образований выше — ~0.04 м/с. В центре моря средние скорости стремятся к нулю (~0–0.01 м/с), поскольку здесь наблюдаются вихри с различным направлением распространения.

Как видно из рис. 5г, максимально часто наблюдаемая амплитуда скорости перемещения сосредоточена в интервалах от ~0.03 до 0.05 м/с. Следующие по вероятности появления пики приходится на значения 0.05–0.07 м/с и 0.01–0.03 м/с, в ~10% случаев  $V_c = 0$  м/с (вихри стационарны). Дискретность результатов связана с ограниченным пространственно-временным разрешением альтиметрических данных. Т.к. шаг сетки составляет ~12.5 км, шаг по времени — 7 сут, тогда точность, с которой можно определить скорость центра, составляет ~0.02 м/с.

Скорость перемещения центра обратно пропорциональна радиусу вихря (см. рис. 5д), т.е. вихри большего размера передвигаются медленнее, маленькие же вихри перемещаются быстрее под действием набегающего потока. С этим могут быть связаны и более высокие скорости, наблюдающиеся у циклонических образований, по сравнению с антициклоническими вихрями (см. рис. 5г), т.е. циклоны в среднем меньшего размера двигаются быстрее, чем крупные антициклоны.

## ЭВОЛЮЦИЯ ВИХРЕЙ

В этом параграфе исследована эволюция различных характеристик вихря в зависимости от времени его существования. Были рассчитаны зависимости параметра вихря (например, радиуса  $R$ ) от текущего времени существования вихря, отнесенного к его полному времени жизни (рис. 6).

Размеры и орбитальные скорости вихрей интенсивно растут на протяжении первых 20% времени их существования (рис. 6а и 6б). К середине жизни они достигают максимальных значений:

**Рис. 4.** (а) Траектории вихрей с временем жизни более 30 недель. Сплошными кружками на графике отмечены места образования вихрей, крестиками — места их исчезновения, сплошными линиями — траектории (черные — антициклоны, серые — циклоны). Окружностями выделены места образования (сплошная линия) и исчезновения вихрей (пунктирная линия) (б) примеры характерных траекторий индивидуальных вихрей (см. пояснения в тексте). Окружностями выделены места стационарирования вихрей.

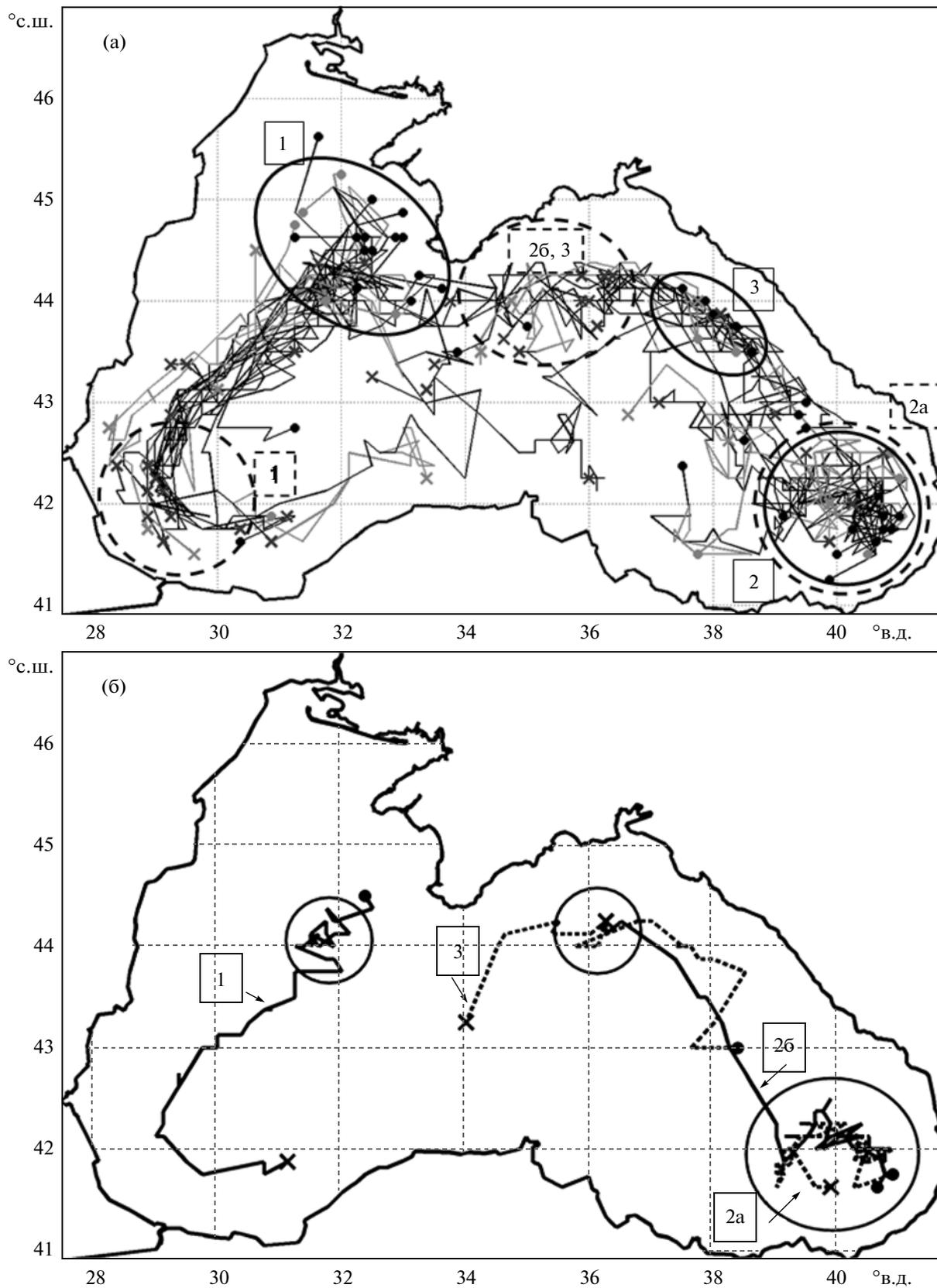
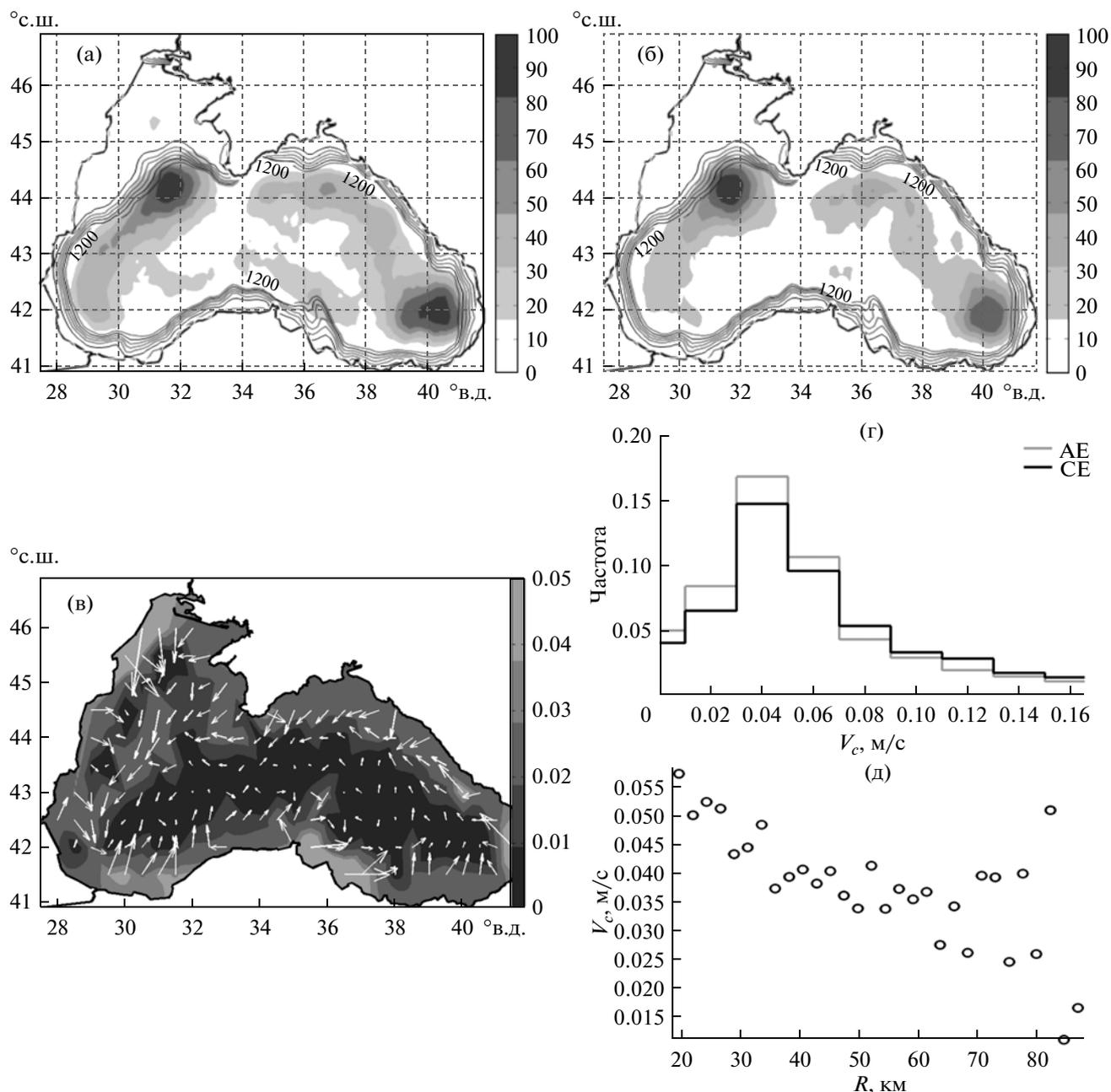


Рис. 4.



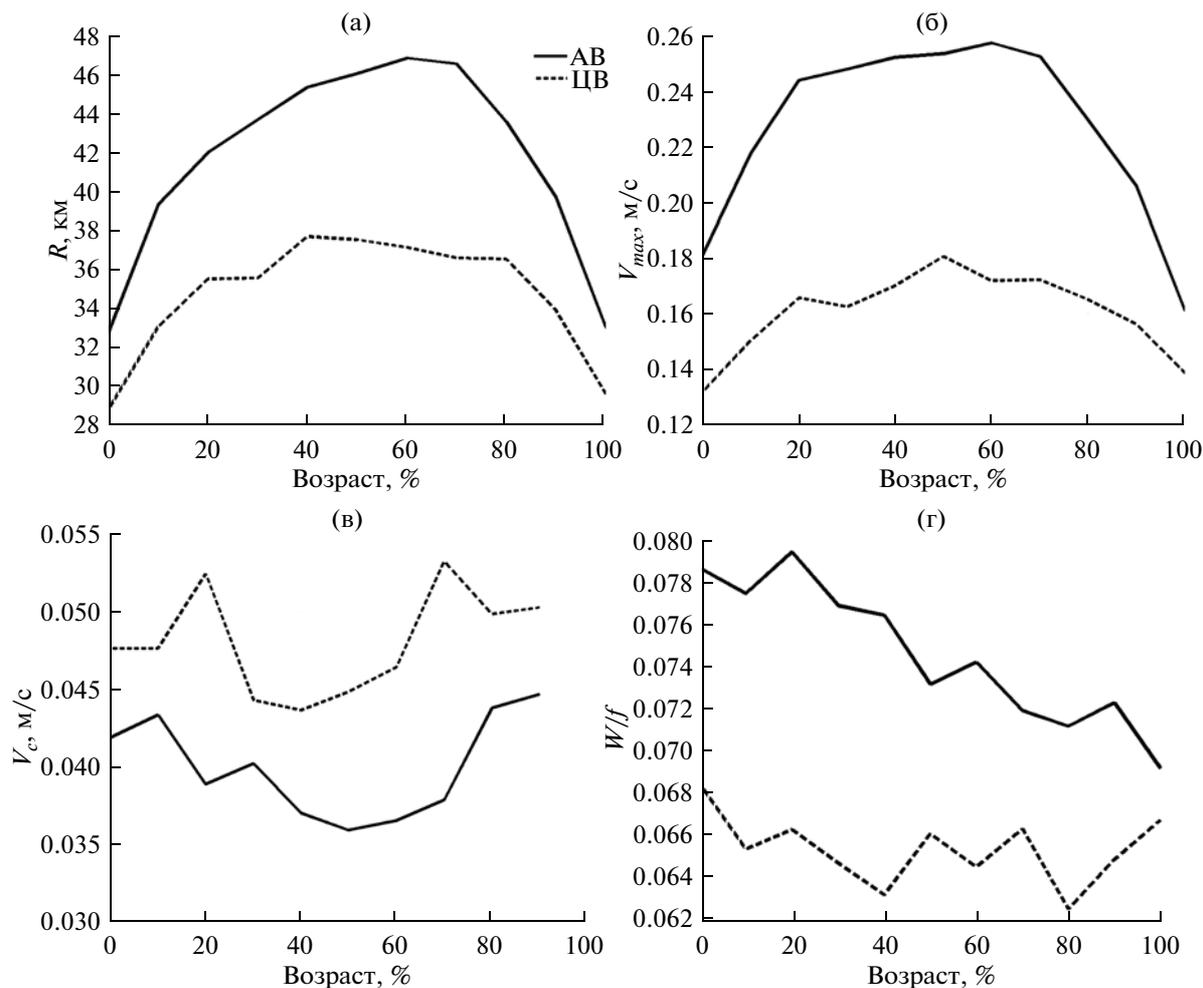
**Рис. 5.** Распределение количества дней в году, в которых в данной точке наблюдается антициклон (а) или циклон (б) (сплошными линиями нанесены изобаты); (в) карта средней скорости перемещения вихрей (м/с); (г) плотность вероятности рассчитанной скорости перемещения центра вихря  $V_c$ ; (д) зависимость между  $V_c$  и  $R$ .

для антициклонов максимумы значений составляют в среднем  $R = 47$  км,  $V_{\max} = 0.26$  м/с, для циклонов в среднем  $R = 37$  км,  $V_{\max} = 0.18$  м/с. После достижения  $\sim 80\%$  времени существования эти параметры начинают интенсивно убывать. Поскольку радиус и орбитальная скорость частиц в вихре коррелируют между собой (см. пункт 4), их зависимости схожи.

Для скорости перемещения центра вихря характерна обратная зависимость (рис. 6в). Мини-

мальные значения достигаются в середине жизни. Этот минимум может быть связан со стационарированием вихрей, которое преимущественно происходит на середине траектории. Вторая возможная причина — увеличение размера вихревых образований к середине жизни, что может приводить к уменьшению скорости их перемещения основным потоком.

Интересно отметить, что несмотря на то, что средние орбитальные скорости частиц в антицик-



**Рис. 6.** Зависимости параметров вихря от процента времени существования вихря (а) радиуса  $R$ ; (б) максимальной орбитальной скорости  $V_{max}$ ; (в) скорости центра  $V_c$ ; (г) среднее число Россби  $\langle W \rangle / f$ .

лонах растут в первую половину времени их существования, их средняя плотность энергии (рисунок не показан), определенная как средняя кинетическая энергия, деленная на площадь вихря, убывает на протяжении всего времени. Аналогичным образом убывает и среднее число Россби (от 0.08 до 0.07, рис. 6г), определенное как отношение средней завихренности к параметру Кориолиса, которое характеризует степень агеострофичности вихря. Таким образом, на первых этапах существования вихри более агеострофичны, а значимость силы Кориолиса возрастает по мере эволюции.

### ВЫВОДЫ

С помощью метода автоматической идентификации вихревых структур, основанного на нахождении замкнутых линий тока в поле аномалий скорости течений по данным спутниковой альтиметрии, были проведены исследования синопти-

ческих вихревых структур в Черном море. За период с 1992 по 2011 гг. было идентифицировано и исследовано более 800 индивидуальных вихрей различного знака с временем жизни более 4 недель и диаметром более 40 км.

Установлено, что в Черном море наблюдается больше циклонических вихревых образований, чем антициклонических, однако антициклоны существуют в среднем дольше, имеют большие радиус и орбитальную скорость. Вихри имеют эллиптическую форму (наиболее вероятное отношение малой к большой оси равно 0.6) и обнаруживают тенденцию к развороту большой оси в зональном направлении. Вихри, вытянутые в меридиональном направлении, обладают наибольшим эксцентриситетом, т.е. являются наиболее “сплюснутыми”, а вытянутые в зональном направлении имеют форму, близкую к круговой.

Рассчитаны траектории движения вихревых структур и выделено четыре основных типа тра-

екторий долгоживущих вихрей с продолжительностью жизни более полугода:

1) вихри образуются к западу от Крымского полуострова и движутся вдоль континентального склона на юго-запад, диссипируя к северу от пролива Босфор;

2) вихри образуются в юго-восточной части бассейна, и на протяжении всего существования остаются квазистационарными;

3) вихри образуются в юго-восточной части бассейна, трансформируются в вихри открытого моря и движутся на северо-запад, справа от струи ОЧТ;

4) вихри образуются в районе Туапсе и Сочи и движутся вдоль континентального склона на северо-запад, исчезая у южного берега Крыма.

Из всех рассмотренных, наиболее долгоживущими являются антициклоны, образованные и долгое время остающиеся квазистационарными в районе Батуми, которые в процессе эволюции становятся вихрями открытого моря. Для каждой из их траекторий характерно наличие зон стационарирования, в которых движение вихря вдоль потока ОЧТ замедляется. Максимумы синоптической активности в Черном море находятся в этих зонах. Возможной причиной возникновения этих зон являются особенности рельефа дна, а именно, наличие топографической “ловушки”, характерной для каждой из зон, что, в частности, обсуждалось в работах [15, 16, 27].

Перемещения вихрей происходят преимущественно вдоль ОЧТ, а скорость перемещения обратно пропорциональна радиусу вихря. До половины времени жизни вихревого образования его радиус и орбитальная скорость растут, после ~80% времени жизни вихря они начинают интенсивно убывать. В то же время средняя завихренность и плотность кинетической энергии максимальны во время образования вихря и убывают на протяжении его дальнейшего существования.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-45-01526).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В. и др. Мезомасштабная динамика вод Черного моря // Океанология на старте XXI века. М.: Наука, 2008. С. 11–42.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П. и др. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С. 71–81.
3. Голубев Ю.Н., Тузилкин В.С. Кинематика и структура вод антициклонического вихревого образования в центральной части Черного моря // Океанология. 1990. Т. 30. № 4. С. 575–581.
4. Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А. и др. Вихревые структуры и горизонтальный водообмен в Черном море // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. Зацепин А.Г., Флинт М.В. М.: Наука, 2002. С. 55–81.
5. Каримова С.С. Исследование нестационарных вихревых структур Черного моря по данным инфракрасных и оптических изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 228–244.
6. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. и др. Влияние циркуляции вод и вихревых образований на глубинное положение верхней границы сероводородной зоны Черного моря // Океанология. 2000. Т. 40. № 6. С. 816–825.
7. Латун В.С. Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 г. // Морск. гидрофиз. журн. 1989. № 3. С. 27–35.
8. Латун В.С. Влияние антициклонических вихрей на водообмен между северо-западным мелководьем и глубоководной частью Черного моря // Комплексные экологические исследования Черного моря, Севастополь: МГИ НАНУ, 1995. С. 37–47.
9. Blokhina M.D., Afanasyev Y.D. Baroclinic instability and transient features of mesoscale surface circulation in the Black Sea: Laboratory experiment // J. Geophys. Res.. 2003. V. 108. № C10. P. 3322.
10. Chaigneau A., Gizolme A., Grados C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns // Progress In Oceanography. 2008. № 79. Issues 2–4. P. 106–119.
11. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies/ Progress In Oceanography. 2011. V. 91. Issue 2. P. 167–216.
12. Chen G., Hou Y., Chu X. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C06018.
13. D’Hieres G.C., Davies P.A., Didelle H. Laboratory Studies of Pseudo - Periodic Forcing Due to Vortex Shedding from an Isolated Solid Obstacle in a Homogeneous Rotating Fluid / Eds. Nihoul J.C.J., Jamart B.M. Elsevier Oceanography Series. Elsevier. 1989. № 50. P. 639–653.
14. Fu L.-L. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A handbook of Techniques and Applications // International Geophysics series. Academic Press. 2001. V. 69. 463 p.
15. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G. et al. Mesoscale eddies and related processes in the north-eastern Black Sea // J. Mar. Syst. 2002. № 32. P. 71–90.
16. Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Krivosheya V.G. et al. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea // J. Mar. Syst. 2002. № 32. P. 91–106.
17. Isern-Fontanet J., Garcna-Ladona E., Font J. Identification of marine eddies from altimetry maps // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. № 5. P. 772–778.
18. Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A. et al. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // J. Geophys. Res. 2003. V 108. № C4. P. 3122.
19. Le Traon P.-Y. Dibarboure G. Ducet N. Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities

- of Multiple-Altitude Missions // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2001. V. 18. № 5. P. 1277–1288.
20. *Nezlin M.V., Sutyryn G.G.* Long-Lived Solitary Anticyclones in the Planetary Atmospheres and Oceans, In *Laboratory Experiments and in Theory* / Eds. Nihoul J.C.J., Jamart B.M. Elsevier Oceanography Series. Elsevier. 1989. № 50. P. 701–719.
  21. *Oguz T., Latun V.S., Latif M.A. et al.* Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* 1993. V. 40. № 8. P. 1597–1612.
  22. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // *Deep-Sea Res. and oceanographic abstracts.* 1970. V. 17. № 3. P. 445–454.
  23. *Pascual A., Faugère Y., Larnicol G. et al.* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № 2. L 202611.
  24. *Sadarjoen A., Post F.H.* Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry // *Visualization and Computer Graphics.* 2000. V. 24. № 3. P. 333–341.
  25. *Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R.* Anatomy of shelf–deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment.* 2010. № 114. P. 867–875.
  26. *Souza J.M.A.C., de Boyer Montégut C., Le Traon P.Y.* Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean // *Ocean Sci.* 2011. V. 7. P. 317–334.
  27. *Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V. et al.* Rim Current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model // *J. Mar. Syst.* 2001. V. 31. № 1. P. 137–157.
  28. *Sur H.I., Ilyin Y.P.* Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // *Progress in Oceanography.* 1997. V. 39. № 2. P. 109–151.
  29. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // *Physica.* 1992. V. 48. № 2. P. 273–294.
  30. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C83246. P. 1–27.

## Mesoscale Eddies in the Black Sea from Altimetry Data

A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

Mesoscale eddies in the Black Sea are investigated using automated eddy identification method “winding angle” based on high-resolution regional altimetry data. More than 800 eddies of different sign with diameter more than 40 kilometers and life span more than one month were detected for the period 1992–2011 years. Using the derived array in our work we investigate the quantity, life span, geometrical and kinematic characteristic of the eddies, the features of the spatial distribution and evolution of the eddies in the Black Sea.