
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД И МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЯПОНСКОМ
МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛТИМЕТРИИ**© 2023 г. И. А. Жабин^а*, Е. В. Дмитриева^а, С. Н. Таранова^а, В. Б. Лобанов^а^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: zhabin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 25.04.2023 г.

Пространственное распределение и изменчивость мезомасштабных вихрей в Японском море исследованы при помощи региональной базы данных, созданной на основе Атласа мезомасштабных вихрей AVISO. База данных содержит информацию о траекториях движения и параметрах мезомасштабных вихрей Японского моря. Вихри выделялись и отслеживались в последовательных полях абсолютной динамической топографии уровенной поверхности океана. За период наблюдений (1993–2020 гг.) в Японском море было выделено 592 вихря с продолжительностью существования более 90 сут (антициклонические – 361 и циклонические – 231). Среднее время существования мезомасштабных вихрей составляло 202 дня для антициклонических и 143 дня для циклонических вихрей при среднем значении радиуса 59 ± 11 км для антициклонов и 61.0 ± 12 км для циклонов. Средняя скорость перемещения антициклонических и циклонических вихрей была равна 2.8 и 3.7 см/с, средняя орбитальная скорость геострофических течений на внешнем контуре составляла 19.0 и 15.1 см/с. Наибольшее количество случаев формирования и разрушения антициклонических вихрей наблюдалось в период с высокими значениями поступления вод через Корейский пролив. Для исследования общей циркуляции вод Японского моря были использованы средние карты поверхностных течений, построенные по данным спутниковой альтиметрии. Анализ циркуляции вод и пространственного распределения характеристик мезомасштабных вихрей показал, что устойчивые вихри в Японском море связаны с квазистационарными меандрами Восточно-Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения. Положение меандров определяется взаимодействием течений с рельефом дна (глубоководные впадины и подводные возвышенности).

Ключевые слова: Японское море, циркуляция вод, течения, мезомасштабные вихри, меандры, спутниковая альтиметрия, абсолютная динамическая топография

DOI: 10.31857/S020596142306009X, **EDN:** DGBMIO**ВВЕДЕНИЕ**

Мезомасштабные (синоптические) вихри в океане можно определить как класс явлений с пространственными масштабами от десятков до нескольких сотен километров и временными масштабами от месяца до года. Мезомасштабные вихри в основном формируются за счет бароклинной/баротропной неустойчивости течений, под воздействием ветра или над топографическими неоднородностями рельефа дна. Вихревые структуры связаны с локальными максимумами и минимумами уровенной поверхности океана, поэтому на основе спутниковой альтиметрии можно проводить исследования мезомасштабных вихрей. Анализ спутниковых альтиметрических данных позволяет выделить области с высокой вихревой активностью и определить параметры вихревых структур.

Японское море относится к районам океана с высоким уровнем мезомасштабной активности. Мезомасштабные вихри в основном связаны с

постоянными течениями. Теплая южная субтропическая и холодная северная субарктическая части моря разделены субполярным (субарктическим) фронтом, на котором наблюдается активное вихреобразование. Японское море часто рассматривают как естественную морскую лабораторию, позволяющую с меньшими затратами проводить исследование процессов, которые оказывают влияние на структуру и динамику вод океана.

В настоящее время для изучения циркуляции вод и мезомасштабных вихрей Японского моря широко используется спутниковая информация, в первую очередь данные альтиметрических наблюдений. Статистический анализ альтиметрических данных позволил выделить основные энергоактивные зоны моря, связанные с мезомасштабной изменчивостью. В последние годы получили дальнейшее развитие методы выделения и отслеживания вихревых структур по альтиметрическим данным. В частности, был разрабо-

тан метод автоматической идентификации мезомасштабных вихрей по замкнутым контурам в последовательных полях абсолютной динамической топографии уровня поверхности океана (сайт AVISO, Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product.html>, далее — "Атлас..."). В глобальном массиве "Атласа..." содержится информация о полярности (антициклон/циклон), горизонтальном масштабе, амплитуде и максимальной орбитальной скорости на внешнем контуре вихря. Для каждого индивидуального вихря можно получить ряд дополнительных динамических и кинематических характеристик: траекторию движения вихря, длину траектории и скорость передвижения. Этот набор данных позволяет провести расчеты статистических характеристик вихревого поля и рассмотреть пространственно-временную изменчивость мезомасштабных вихрей. На основе глобального массива ("Атлас...") можно создавать региональные базы данных и проводить детальные исследования мезомасштабных вихревых структур в отдельных районах океана. Для этой цели была создана база данных по мезомасштабным вихрям Японского моря. Основная цель работы была определена следующим образом: на основе регионального массива исследовать пространственно-временную изменчивость вихревого поля и рассмотреть статистические характеристики мезомасштабных вихрей в Японском море. Для достижения этой цели по данным спутниковой альтиметрии рассмотрена общая циркуляция вод Японского моря. В основной части исследования определены траектории движения мезомасштабных вихрей, выполнены расчеты статистических характеристик антициклонических и циклонических вихрей, установлено положение районов формирования и разрушения вихревых структур. При этом особое внимание уделялось устойчивым или квазистационарным вихрям, формирование которых связано с меандрированием Восточно-Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования общей циркуляции вод Японского моря были использованы среднегодовые данные альтиметрических наблюдений (1993–2021). Распределение и изменчивость мезомасштабных вихрей рассмотрены по данным спутниковой альтиметрии AVISO ("Атлас..."). В первых версиях "Атласа..." в качестве входного массива для выделения мезомасштабных вихрей использовались поля аномалий уровня моря относительно средней уровенной поверхности. В настоящее время вихри идентифицируются и отслеживаются в последовательных полях абсо-

лютной динамической топографии поверхности океана (массив METAS.1exp DT allsa). При создании этого продукта использовались данные всех альтиметрических спутников, которые работали на орбите в период с 1 января 1993 по 7 марта 2020 г. Исходные поля абсолютной динамической топографии поверхности океана имеют пространственное разрешение 0.25° , временное — 1 сутки. Метод идентификации и отслеживания движения мезомасштабных вихрей детально рассмотрен в работах (Pegliasco et al., 2021; Pegliasco et al., 2022).

Исходный массив информации о мезомасштабных вихрях имеет глобальное покрытие, в качестве входной информации используется поля абсолютной динамической топографии ADT (Absolute Dynamic Topography). ADT определяется как сумма средней динамической топографии (MDT – Mean Dynamic Topography) и аномалий уровня моря (SLA-Sea Level Anomaly). Средняя динамическая топография океана MDT CNES-CLS18 определялась по данным спутниковой альтиметрии, гравиметрии и прямым океанографическим наблюдениям (Taburet et al., 2019).

Идентификация вихрей по замкнутым контурам в последовательных полях ADT проводится при помощи алгоритма, разработанного AVISO в сотрудничестве с Э. Мейсоном (Mason et al., 2014). При помощи этой процедуры определяется тип вихря (антициклон/циклон), координаты центра, радиус замкнутого контура с максимальными геострофическими скоростями и средняя скорость на этом контуре (орбитальная скорость), эффективный радиус (средний радиус внешнего замкнутого контура), амплитуда и ряд дополнительных характеристик. Мезомасштабные вихри выделялись по одному экстремуму в поле ADT, пороговое значение составляло 0.4 см. В региональном массиве рассматривались только вихри с продолжительностью существования более 90 сут, которые могут оказывать существенное влияние на сезонную изменчивость структуры и динамики вод Японского моря.

ОБЩАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ

Общая циркуляция вод Японского моря определяется системой постоянных течений. (Юрасов, Яричин, 1991; Prelle, Hogan, 1998; Oceanography... 2016). Восточно-Корейское и Цусимское течения связаны с поступлением субтропических вод через Корейский (Цусимский) пролив (географические названия представлены на рис. 1). Приморское течение наблюдается в северной части моря у побережья Приморья. Северо-Корейское течение следует вдоль северо-восточного побережья Корейского полуострова. В северной части моря над Японской глубоководной котловиной

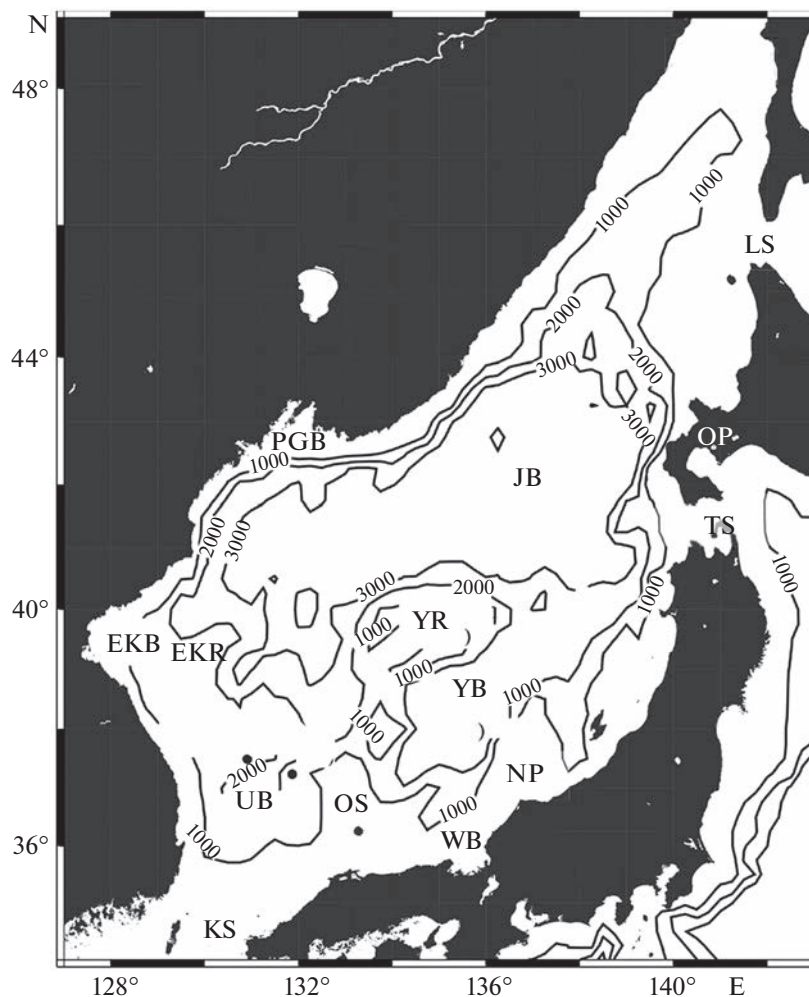


Рис. 1. Батиметрическая карта Японского моря. Условные обозначения: KS – Корейский (Цусимский) пролив; TS – Сангарский (Цугару) пролив; LS – пролив Лаперуза (Соя); UB – котловина Уллындо; YB – котловина Ямато; JB – Японская котловина; YR – возвышенность Ямато; OS – поднятие Оки; EKR – Восточно-Корейская возвышенность; EKB – Восточно-Корейский залив; PGB – залив Петра Великого; OP – полуостров Осима; NP – полуостров Ното; WB – залив Вакаса.

наблюдается основной циклонический круговорот. В центральной и северо-восточной частях моря формируется субполярный (субарктический) фронт, разделяющий теплую южную (субтропическую) и холодную северную (субарктическую) части моря. На циркуляцию вод Японского моря оказывает существенное влияние водообмен с Восточно-Китайским морем, Тихим океаном и Охотским морем. К основным факторам, определяющим динамику вод моря относятся муссонный ветровой режим и сезонная изменчивость потоков тепла и влаги через поверхность.

Карта-схема циркуляции вод, построенная на основе среднесуточных спутниковых альтиметрических данных (средние скорости абсолютных геострофических течений за период с 1993 по 2020) показывает положение основных течений Японского моря (рис. 2). Воды Восточно-Корей-

ского течения поступают в Японское море через западный проход Корейского пролива. Ветвь этого течения отделяется от побережья Кореи в районе котловины Уллындо (~ на 37–38° с.ш.). Основной поток продолжает следовать вдоль побережья Кореи приблизительно до 39° с.ш., затем поворачивает на восток и движется вдоль южной границы субполярного фронта. Воды Восточно-Корейского течения участвуют в формировании фронтального антициклонического меандра, центр которого расположен вблизи 41° с.ш., 131.5° в.д. Воды Цусимского течения, которые поступают в Японское море через восточный проход Корейского пролива у юго-западного побережья о. Хонсю разделяются на две ветви. Прибрежное Цусимское течение следует вдоль побережья острова и выходит в Тихий океан через Сангарский пролив. Основной (мористый) поток вод Цусимско-

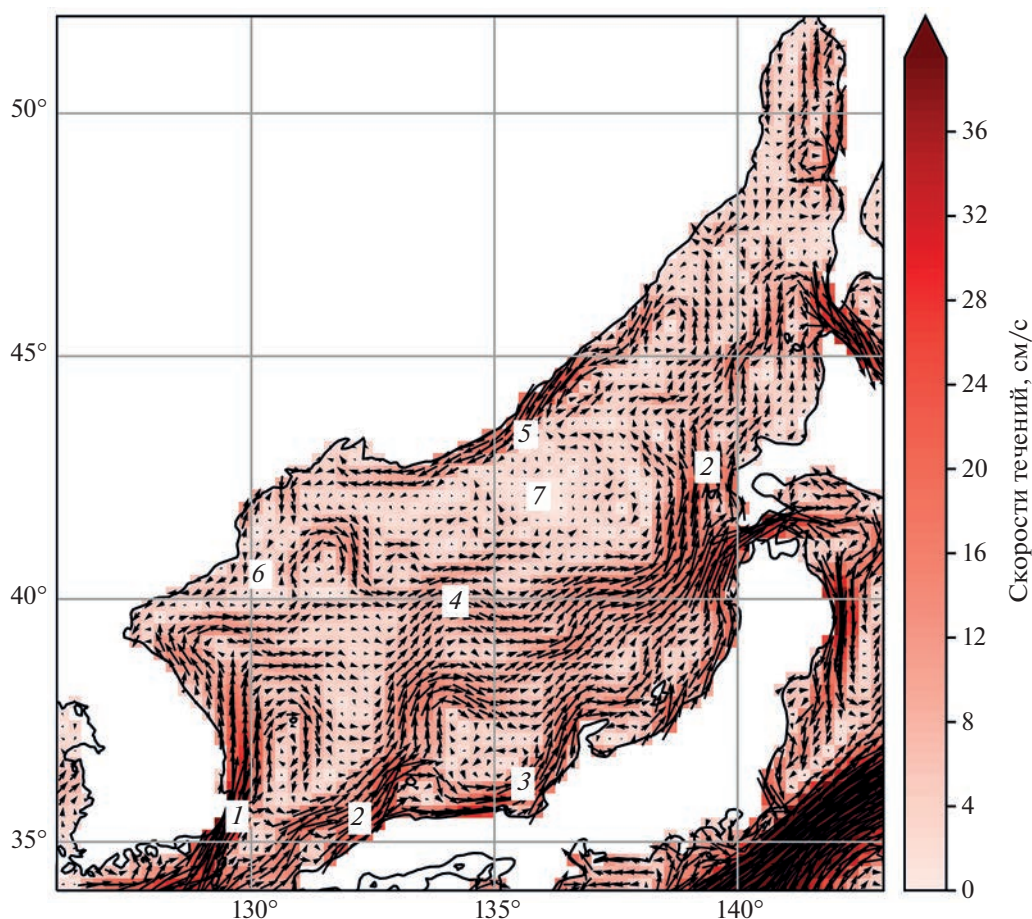


Рис. 2. Средняя циркуляция вод Японского моря по данным спутниковой альтиметрии (абсолютные геострофические течения, 1993–2021). Условные обозначения: 1 – Восточно-Корейское течение; 2 – Цусимское течение; 3 – Прибрежная ветвь Цусимского течения; 4 – Субполярное фронтальное течение; 5 – Приморское течение; 6 – Северо-Корейское течение; 7 – основной циклонический круговорот северной части Японского моря.

го течения огибает поднятие Оки и затем продолжает движение в северо-восточном направлении по направлению к субполярному фронту. Продолжение Цусимского течения хорошо выражено у западного побережья о. Хоккайдо. Воды этого потока выходят в Охотское море через пролив Лаперуза. Карта распределения средних векторов абсолютных геострофических течений показывает, что в западной части Японского моря формирование субполярного фронта определяется водами Восточно-Корейского течения. В восточной части моря фронтальная зона находится под влиянием Цусимского течения. У побережья о. Хоккайдо формируется северо-восточный участок субполярного фронта. В северной части моря у побережья Приморья хорошо выражено Приморское течение. Северо-Корейское течение, которое можно рассматривать как продолжение Приморского течения, прослеживается от залива Петра Великого до Восточно-Корейского залива. На карте можно выделить основной циклониче-

ский круговорот, который располагается над Японской глубоководной котловиной. Восточную периферию этого круговорота формирует Цусимское течение у побережья о. Хоккайдо, западную – Приморское и Северо-Корейское течения. Сюда циклонический круговорот замыкается субполярным фронтальным течением.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Японское море относится к районам с высоким уровнем мезомасштабной активности (рис. 3). Типичный горизонтальный масштаб мезомасштабных вихрей в Японском море составляет 100–150 км, в вихревом поле присутствуют вихревые структуры с масштабом в несколько десятков километров (например, Park and Chung, 1999). Выделение энергоактивных зон в Японском море, связанных с мезомасштабной изменчивостью в основном проводилось на основе статистиче-

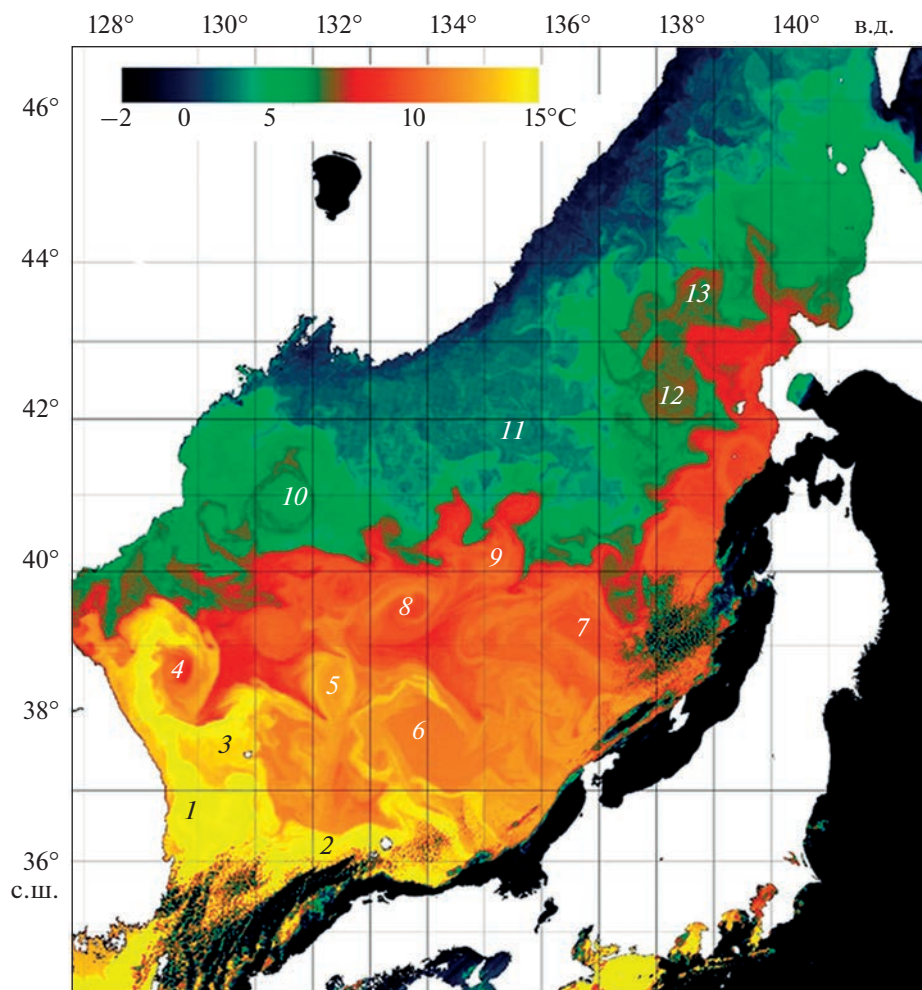


Рис. 3. Спутниковое ИК-изображение Японского моря, полученное 4 апреля 2021 г. Рис. 3. Распределение температуры воды на поверхности Японского моря по данным спутника NOAA-19 (4 апреля 2021 г.). Условные обозначения: 1 – Восточно-Корейское течение; 2 – Цусимское течение; 3 – вихрь Уллындю; 4 – вихрь Вонсан; 5, 6, 7 – вихри южной части моря; 8, 9 – вихри возвышенности Ямато; 10 – вихрь в западной части субполярного фронта; 11 – вихрь к северу от фронта; 12, 13 – вихри северо-восточной части моря.

ского анализа данных спутниковой альтиметрии, дрейферным наблюдениям и результатам расчета вихревой кинетической энергии (Morimoto et al, 2000; Lee, Niiler, 2005; Trusenкова, Kaplunenko, 2022). Значительная мезомасштабная активность в южной части моря связана с Восточно-Корейским и Цусимским течениями. В северной части моря уровень мезомасштабной изменчивости значительно уменьшался. Локальные максимумы вихревой кинетической энергии наблюдались только у побережья о. Хоккайдо (Цусимское течение), в области Приморского течения и в северо-западной части Японского моря. Восточно-Корейское и Цусимское течения усиливаются в теплый сезон и ослабевают в холодную половину года (Morimoto, Yanagi, 2001; Трусенкова, 2014). Усиление или ослабление общей циркуляции вод

связано с сезонной изменчивостью водообмена через Корейский пролив.

В настоящее время хорошо изучены вихри Восточно-Корейского течения. Данные альтиметрии были использованы для исследования мезомасштабных вихрей у побережья южной Кореи (Lee, Niiler, 2010). Вихри, связанные с Восточно-Корейским течением условно разделяются на три группы: (1) прибрежные вихри, которые наблюдаются между юго-восточным побережьем Корейского полуострова и основной струей Восточно-Корейского течения, (2) меандры и вихри, которые формируются после отделения Восточно-Корейского течения от побережья (~39° с.ш.) и (3) теплый антициклонический вихрь в районе о. Уллындю – котловины Уллындю (вихрь Уллындю) и холодный циклонический вихрь к западу от островов Лианкур, корейское название которых о.

Док (вихрь Док). Последние два вихря рассматриваются как устойчивые квазистационарные вихри. Средний диаметр вихрей у побережья Кореи составлял 80–120 км. Диаметр квазистационарного вихря Уллындо достигал значений ~150 км. Продолжительность существования устойчивых вихрей могла превышать 1 год. Скорости течений в антициклонах Восточно-Корейского течения достигают значений 65 см/с. Мезомасштабные вихри северной части котловины Уллындо перемещаются в северном направлении. Вихревые образования южной части этой котловины двигаются к востоку в направлении поднятия Оки (Morimoto et al., 2000). Формирование теплого вихря Уллындо определяется рециркуляцией вод Восточно-Корейского течения над котловиной Уллындо (Mitchell et al., 2005a; Shin et al., 2005; Trasey et al., 2005). Вихрь Уллындо содержит ядро однородных по вертикали вод в слое 0–300 м. Положение этого вихря изменяется как в сезонном, так и в межгодовом масштабах времени. Среднее положение центра было определено как 37.5° с.ш., 130.5° в.д. Холодный циклонический вихрь Док формируется в результате интрузии (вторжения) более холодных вод из южной части субполярной фронтальной зоны в юго-восточную часть моря (Mitchell et al., 2005b). Условный центр вихря расположен на 36.5° с.ш., 131.5° в.д., диаметр составляет ~60 км. Скорости поверхностных течений на периферии вихря Док достигают значений 10–30 см/с.

Основная часть потока вод Восточно-Корейского течения продолжает движение в северном направлении вдоль побережья Кореи до ~39° с.ш. При подходе к Восточно-Корейской возвышенности эта ветвь отделяется от побережья и формирует антициклонический меандр с центром, расположенным приблизительно на 39.0° с.ш., 130° в.д. С этим меандром связан хорошо выраженный устойчивый антициклонический вихрь, известный как вихрь Вонсан (Lee, Niiler, 2005; Lee, Niiler, 2010).

Антициклонический меандр, связанный с продолжением Восточно-Корейского течения наблюдается в районе, расположенном между 40–42° с.ш., 130 и 132° в.д. (рис. 2). Эта мезомасштабная структура связана с северо-западным фронтом (Zhao et al., 2014). Северо-западный меандр отличается хорошо выраженной сезонной изменчивостью. Зимой в пределах этого меандра формируется антициклонический вихрь (Prants et al., 2017). Северо-западный меандр обеспечивает адвекцию вод южной части моря по направлению к южному Приморью. В работе (Kim et al., 2021) на основе анализа альтиметрических данных показано, что интенсификация мезомасштабной активности в районе северо-западного меандра в осенний период связана с вторжением более теплых и распресненных вод из юго-западной части

моря (продолжение Восточно-Корейского течения), которое по времени совпадает с усилением переноса вод через Корейский пролив. На формирование мезомасштабных вихрей в северо-западной части Японского моря оказывают влияние ветровые условия (зимний муссон). Таким образом, в районе Восточно-Корейского течения наблюдается несколько квазистационарных антициклонических мезомасштабных вихревых образований. Вихрь Уллындо связан с рециркуляционной ветвью этого течения. Вихрь Вонсан образуется при отрыве основного потока течения от побережья Кореи в районе ~39° с.ш. Северо-западный вихрь-меандр формируется в результате адвекции вод, связанных с Восточно-Корейским течением. Наиболее устойчивый циклонический вихрь наблюдается в районе островов Лианкур (вихрь Док).

К основным особенностям структуры и динамики вод Японского моря относится субполярный фронт (Park et al., 2004; Zhao et al., 2014). В западной части моря субполярный фронт связан с Восточно-Корейским течением, которая отделяется от побережья Кореи между 38–39° с.ш. В северо-западной части моря в осенне-зимний период формируется северо-западный фронт. В центральной и восточной частях моря субполярный фронт наблюдается между 39–40° с.ш. С субполярным фронтом связано зональное фронтальное течение. В формировании субполярной фронтальной зоны в восточной части Японского моря участвует Цусимское течение. Условную границу между зонами влияния Восточно-Корейского и Цусимского течений можно провести по возвышенности Ямато. В северо-восточной части Японского моря субполярный фронт связан с продолжением Цусимского течения у побережья о. Хоккайдо. Мезомасштабные антициклонические и циклонические вихри в районе субполярного фронта регулярно регистрируются на спутниковых ИК-изображениях (рис. 3). Во фронтальной зоне наблюдаются от 3 до 7 относительно устойчивых вихревых образований (Гинзбург и др., 1998; Lee et al., 2006; Lee, Niiler 2010; Никитин, Юрасов 2008; Лобанов и др., 2007). К формированию мезомасштабных вихрей приводит меандрирование субполярного фронта в районе возвышенности Ямато. Устойчивый антициклонический вихрь регулярно наблюдался над западным склоном поднятия Ямато (39.5° с.ш., 134.5° в.д.). Этот теплый вихрь рассматривается как квазистационарный, положение вихревого образования контролируется донной топографией (Isoda et al., 1992a; Isoda et al., 1992b). В южной части фронтальной зоны антициклонические вихри (диаметр ~100 км) связаны с вторжениями вод Восточно-Корейского и Цусимского течений. К северу от фронта наблюдались вихри с горизонтальным масштабом 40–70 км

(Лобанов и др., 2007). В качестве наиболее вероятных механизмов формирования вихрей субполярной фронтальной зоны рассматривались меандрирование фронтального течения при взаимодействии с возвышенностью Ямато и бароклинная неустойчивость фронтального течения. Формирование однородных ядер вихревых образований происходит за счет зимней конвекции и фронтальной субдукции (Isoda et al., 1992; Ou, Gordon, 2002; Lee et al., 2006; Hogan, Hurlburt, 2006).

Высокие уровни мезомасштабной изменчивости в юго-восточной части Японского моря связаны с Цусимским течением. По данным спутниковой альтиметрии (Yabe et al., 2021) летом Цусимское течение имеет более устойчивую траекторию. В зимний период наблюдается меандрирование как прибрежной, так и основной мористой ветвей течения. Антициклонические вихри с теплым ядром наблюдались у о. Хонсю в транспортном “коридоре”, который расположен между поднятием Оки и полуостровом Ноки (Isoda, Nishihara, 1992). Вихревые образования формировались над возвышенностью Оки и разрушались по мере движения к Сангарскому проливу (Isoda, 1994). Продолжительность существования вихрей котловины Ямато обычно составляет несколько месяцев и в отдельных случаях превышает один год (Lee, Niiler, 2010). Вихри перемещаются в северо-восточном направлении вдоль побережья о. Хонсю со скоростями 0.5–2.0 см/с. Горизонтальный масштаб мезомасштабных вихрей в этой части Японского моря изменяется от 50–70 до 100–150 км. Наиболее устойчивый антициклонический вихрь в юго-восточной части моря связан с квазистационарным меандром основной ветви Цусимского течения, которое огибает возвышенность Оки (~37.5° с.ш., 134° в.д.). Квазистационарный вихрь-меандр Оки хорошо выражен в зимний период. Формирование или обновление ядра этого антициклонического вихря происходит за счет зимнего конвективного перемешивания (Hogan, Hurlburt 2006). Летом в этом районе часто наблюдается циклонический вихрь (Yabe et al., 2021). Формирование этого вихря может быть связан с рециркуляцией вод прибрежной ветви Цусимского течения в заливе Вакаса (рис. 2). Относительно устойчивый антициклонический вихрь, связанный с меандром Цусимского течения наблюдается у п-ова Ноки (Gordon et al., 2002).

В южной части Японского моря выделяются несколько квазистационарных вихревых образований, определяемых как внутритермоклинные вихри (Gordon et al., 2002). Диаметр таких антициклонических вихрей превышает 100 км, вертикальный масштаб составляет более 100 м. Внутритермоклинный вихрь, связанный с Восточно-Корейским течением, наблюдался над котловиной Уллындо (вихрь Уллындо). Устойчивый внутритермоклинный вихрь в юго-восточной части

Японского моря (Цусимское течение) был обнаружен над поднятием Оки. Вихри этого типа наблюдались в районе котловины Ямато. Антициклонические внутритермоклинные вихри имеют слабостратифицированное ядро. В слое верхнего термоклина наблюдается куполообразный подъем изолиний по направлению к поверхности, в нижней части происходит опускание изопикн. Ядра внутритермоклинных вихрей могут формироваться (или обновляться) в результате зимнего конвективного перемешивания (Hogan, Hurlburt, 2006). Параметры ядер квазистационарных антициклонических вихрей близки к характеристикам зимнего поверхностного перемешанного слоя в районах формирования этих вихревых структур. Процессы фронтальной субдукции (погружение поверхностных вод в слой термоклина) также могут оказывать влияние на свойства ядер внутритермоклинных вихрей (Lee et al., 2006; Ou, Gordon 2002). Квазистационарные внутритермоклинные вихри оказывают существенное влияние на структуру и динамику вод южной части Японского моря и могут рассматриваться как элементы общей циркуляции вод.

Мезомасштабные вихри северной части Японского моря отличаются меньшими пространственными масштабами, поэтому альтиметрические данные не позволяют уверенно идентифицировать вихревые структуры в этом районе. Информация о мезомасштабных вихрях в субарктическом секторе моря в основном получена при помощи анализа спутниковых изображений в ИК-диапазоне и по данным прямых океанографических наблюдений (Лобанов и др., 2007). На спутниковых снимках вихри регулярно наблюдались в северо-восточной части моря. При этом одновременно регистрировалось от 3 до 8 антициклонических вихря диаметром от 40 до 110 км. Направление движения вихрей определялось общей циркуляцией вод — вихри перемещались по периферии циклонического круговорота Японской глубоководной котловины. У побережья Приморья и Северной Кореи (Приморское и Северо-Корейское течения) вихревые структуры были связаны с областью материкового склона. Большое количество мезомасштабных вихрей наблюдалось у северной границы субполярной фронтальной зоны (40–41° с. ш.). Как район с относительно высокой концентрацией вихревых образований рассматривался северный склон возвышенности Ямато. Скорости движения вихрей в северной части моря изменялись от 1 до 4 см/с. Продолжительность существования вихрей обычно превышала 2 мес. В целом, анализ спутниковых ИК-изображений позволил выделить вихревые структуры в субполярной фронтальной зоне, в области Приморского и Северо-Корейского течений и в районе Японской глубоководной котловины (Лобанов и др., 2007; Пономарев

и др., 2011; Никитин и др., 2012; Ладыченко, Лобанов, 2013; Никитин и др., 2020). Мезомасштабные вихри оказывают существенное влияние на структуру и динамику вод северной части Японского моря. Меандры и вихри субполярного фронта приводят к усилению процесса субдукции и принимают участие в процессе формирования промежуточных вод пониженной солёности (Lee et al., 2006). Мезомасштабные вихри глубоководной Японской котловины оказывают влияние на процессы формирования и распространения глубинных и придонных вод (Takematsu et al., 1999; Talley et al., 2005; Min, Warner, 2005).

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

В этом разделе работы сравниваются результаты, полученные при помощи автоматического метода выделения мезомасштабных вихрей по спутниковой альтиметрии с данными океанографических наблюдений. Океанографические данные были получены в двух рейсах, проведенных в Японском море в июне–августе 1999 г. (Talley et al., 2006). Результаты, полученные в ходе морских экспедиций, позволили установить положение течений, фронтов и мезомасштабных вихрей (рис. 4, а). Положение вихревых структур, показанное на карте-схеме определялось на основе прямых наблюдений за течениями, выполненных при помощи акустических доплеровских измерительных систем ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) и LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) и по результатам расчета геострофического переноса.

В целом, результаты расчета абсолютных геострофических течений по данным спутниковой альтиметрии (рис. 4, б) согласуются со схемой, показывающей положение основных течений, фронтов и вихрей в Японском море в летний период 1999 г. (рис. 4, а). Вихри на рис. 4, а выделены коричневым и синим цветами. Коричневые эллипсы относятся к внутритермоклинным вихрям южной части Японского моря. Синими эллипсами показано положение вихрей в северной части моря. Данные прямых океанографических наблюдений (рис. 4, а) можно сравнить с результатами, полученными при помощи метода выделения мезомасштабных вихрей по замкнутым контурам в последовательных полях абсолютной динамической топографии поверхности океана. На рис. 4 в, 4, г показано распределение антициклонических и циклонических мезомасштабных вихрей в Японском море в 1999 г. Черные точки на рис. 4 в, 4, г — траектории движения вихрей с продолжительностью существования более 10 сут (основной массив “Атласа...”); красные точки —

траектории вихрей с продолжительностью существования более 90 сут; большие синие точки — вихри, которые были выделены по данным спутниковой альтиметрии в период проведения экспедиционных исследований (региональный массив, созданный на основе “Атласа...”). Необходимо отметить, что разрезы, которые были выполнены на научно-исследовательских судах не всегда проходили по центру мезомасштабных вихрей. Это приводит к тому, что положение вихрей, определяемое по океанографическим данным, не совпадает с положением центров вихревых структур, выделенных по альтиметрическим данным. Кроме этого, в 1999 г на орбитах функционировали только два спутника, оснащенные альтиметрами — TOPEX / Poseidon и ERS-2. Расстояние между трассами спутника TOPEX / Poseidon над Японским морем превышало 100 км, период повторяемости измерений на трассах составлял 10 сут. Расстояние между трассами спутника ERS-2 приблизительно равно 70 км с периодом повторяемости 35 сут. Поэтому пространственно-временное разрешение использованного интерполированного массива данных ADT (0.25° и 1 сут) позволяет уверенно выделять только устойчивые квазистационарные мезомасштабные вихри, имеющие диаметр ~100 и более км.

Точность определения центров мезомасштабных вихрей зависит от положения трасс спутников-альтиметров относительно вихревых структур. С учетом этих проблем нельзя ожидать полного соответствия результатов сравнительного анализа океанографических и альтиметрических данных.

По данным океанографических наблюдений в области Восточно-Корейского течения хорошо выражены вихрь Уллындю и вихрь Док. Этих два квазистационарных вихря выделяют на картах, построенной по данным спутниковой альтиметрии. Океанографические наблюдения не проводились в экономической зоне КНДР, где по спутниковым альтиметрическим данным был идентифицирован устойчивый антициклонический вихрь Вонсан, который располагался вблизи Восточно-Корейского залива (рис. 4, в). По спутниковой альтиметрии антициклонический вихрь, связанный с меандром субполярного фронта был обнаружен в районе возвышенности Ямато. Этот вихрь был плохо выражен в полях океанографических характеристик. Как по альтиметрическим, так и по океанографическим данным в области Цусимского течения отчетливо выделялся антициклонический вихрь-меандр Оки. Другой антициклон, связанный с Цусимским течением (39.0° с.ш., 137.5° в.д.) был обнаружен вблизи восточного склона котловины Ямато. Этот вихрь не относится к категории квазистационарных вихрей. В течении 1999 г. антициклон перемещался вдоль побережья о. Хонсю от п-ва Ното в направлении Сангарского пролива. В северной

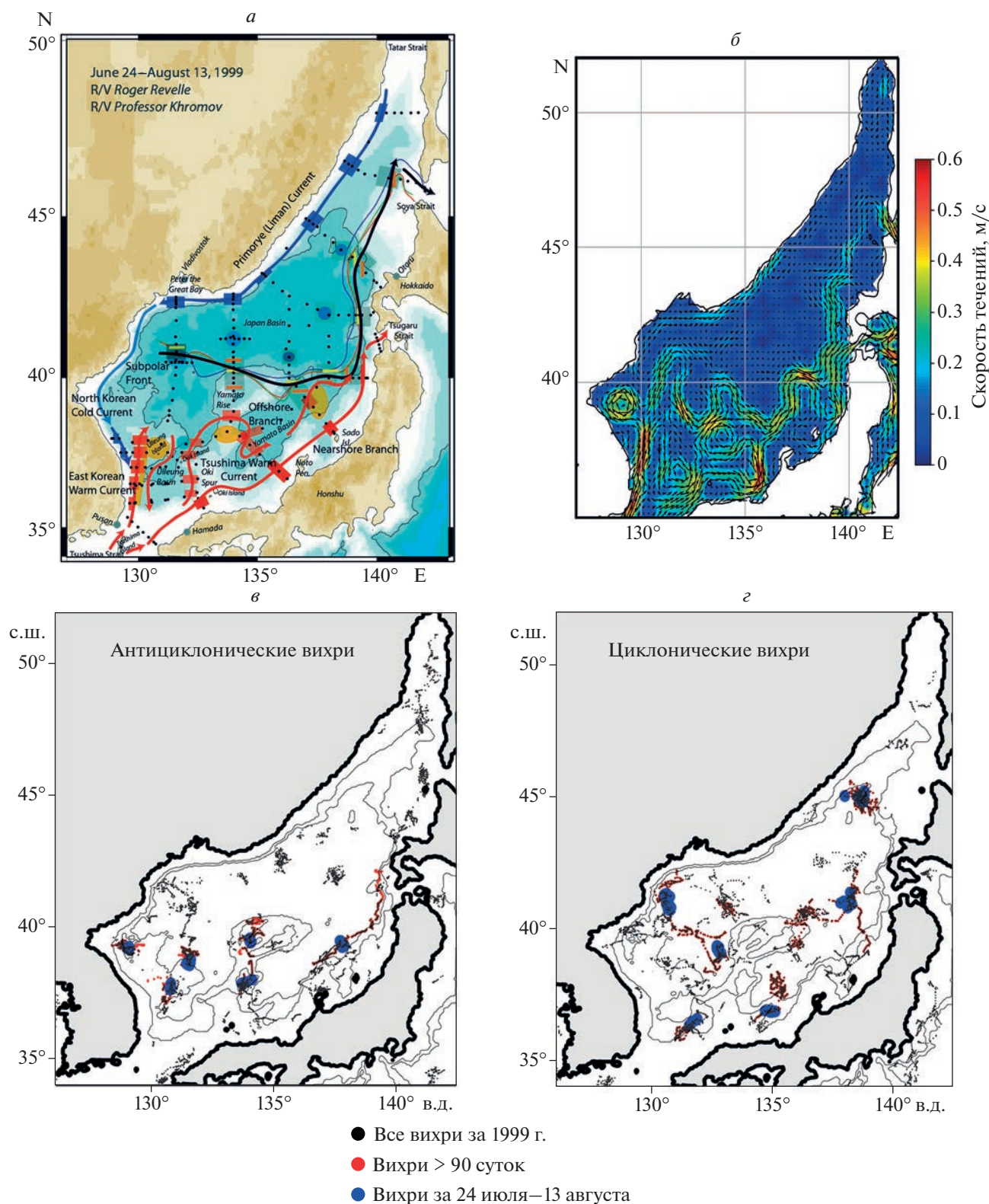


Рис. 4. Положение мезомасштабных вихрей в Японском море по данным океанографических наблюдений в июле–августе 1999 г. (а – Talley et al., 2006), карта распределения скоростей абсолютных геострофических течений 3 августа 1999 г. (б), распределение антициклонических (в) и циклонических (г) вихрей в 1999 г.

части Японского моря по альтиметрическим данным не удалось идентифицировать антициклонические вихри в области Японской глубоководной котловины. Однако, вихревые образования в северной части моря были хорошо выражены в распределении океанографических параметров. В северной части моря наблюдаются относительно низкие уровни мезомасштабной изменчивости (Lee, Niiler, 2005). Поэтому для более детального исследования вихревых образований в этом районе в дальнейшем необходимо уменьшить критерий выделения мезомасштабных вихрей по продолжительности существования. Выбор в качестве такого критерия продолжительности жизни ~1 мес. (время полного цикла спутников с альтиметрами ERS-1, ERS-2, Envisat и SARAL/AltiKaо составляет 35 сут, спутника Sentinel-3 – 27 дней) увеличит количество вихрей и, возможно, позволит согласовать данные спутниковых альтиметрических и судовых океанографических наблюдений.

Можно отметить, что мезомасштабные вихри в северной части Японского моря имеют пространственный масштаб ~70 и менее км. Поэтому такие вихри часто не могут быть уверенно выделены по интерполированным в узлы регулярной сетки значениям аномалий абсолютной динамической уровенной поверхности, которая рассчитывается по альтиметрическим данным, получаемой вдоль подспутниковых трасс.

Можно отметить, что метод выделения структур вихревого типа в последовательных полях ADT позволяет выделять устойчивые антициклонические вихри (время существования более 90 сут), которые связаны с квазистационарными меандрами основных течений Японского моря.

ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Результаты, полученные при помощи метода выделения вихревых структур в последовательных полях ADT позволяют получить информацию о времени существования, траекториях движения и статистических характеристиках мезомасштабных вихрей в Японском море. Всего за период альтиметрических наблюдений (1993–2020) было выделено 578 вихрей с продолжительностью существования более 90 сут. В Японском море преобладали циклонические вихри (305 вихря), количество антициклонов было равно 273. В течение года формировалось приблизительно 12 циклонических и 11 антициклонических вихрей.

Распределение количества мезомасштабных вихрей по продолжительности существования показывает (рис 5, а, 5, б), что в Японском море

преобладали вихри со временем жизни от 90 до 180 сут. На временных масштабах более 180 сут количество антициклонов превышало количество циклонических вихрей. За период наблюдений было выделено 22 антициклона со временем существования более одного года и только 2 долгоживущих циклонических вихря. Среднее время существования антициклонических и циклонических вихрей Японского моря составляло 202 и 143 сут при максимальных значениях 1496 и 731 сут.

Траектории движения относительно короткоживущих антициклонических вихрей (время существования 90–180 сут, рис. 6, а) были связаны с основными течениями Японского моря. В области Восточно-Корейского течения антициклоны наблюдались в районе котловины Улындо и над Восточно-Корейской возвышенностью. Районы с высокой концентрацией траекторий вихревых структур соответствуют антициклоническим вихрям Улындо и Вонсан. Большое количество мезомасштабных антициклонов было связано с зоной субполярного фронта. В области Цусимского течения вихри наблюдались в районе антициклонического меандра над поднятием Оки (вихрь Оки). Антициклонические вихри, связанные с Цусимским течением, выделялись у западного побережья Японии между поднятием Оки и проливом Лаперуза. Траектории движения этих вихрей в основном совпадали с направлением основного потока

Цусимского течения. Мезомасштабные антициклоны наблюдались на северной периферии циклонического круговорота в центральной части Японской котловины. Эти вихри перемещались от юго-западного побережья о. Хоккайдо по направлению к побережью Приморья.

Изолированная группа антициклонических вихрей была выделена в Татарском проливе. Очень высокая концентрация антициклонических вихрей была обнаружена в северо-западной части моря (41–43° с.ш., 130–132° в.д.). Вихри в этом районе связаны с северо-западным меандром субполярного фронта. Антициклоны наблюдались в области материкового склона у побережья южного Приморья и в районе залива Петра Великого.

Характер распределения траекторий движения антициклонических вихрей в южной части Японского моря с продолжительностью существования 181–270 сут (рис. 6, в) существенно не изменился. Наибольшее количество антициклонов наблюдалось в районе Цусимского течения между поднятием Оки и Сангарским проливом. При этом наблюдалось движение вихревых структур в северо-восточном направлении вдоль побережья о. Хонсю. В этом временном диапазоне существенно уменьшилась вихревая активность в северной части Японского моря. Отдельные анти-

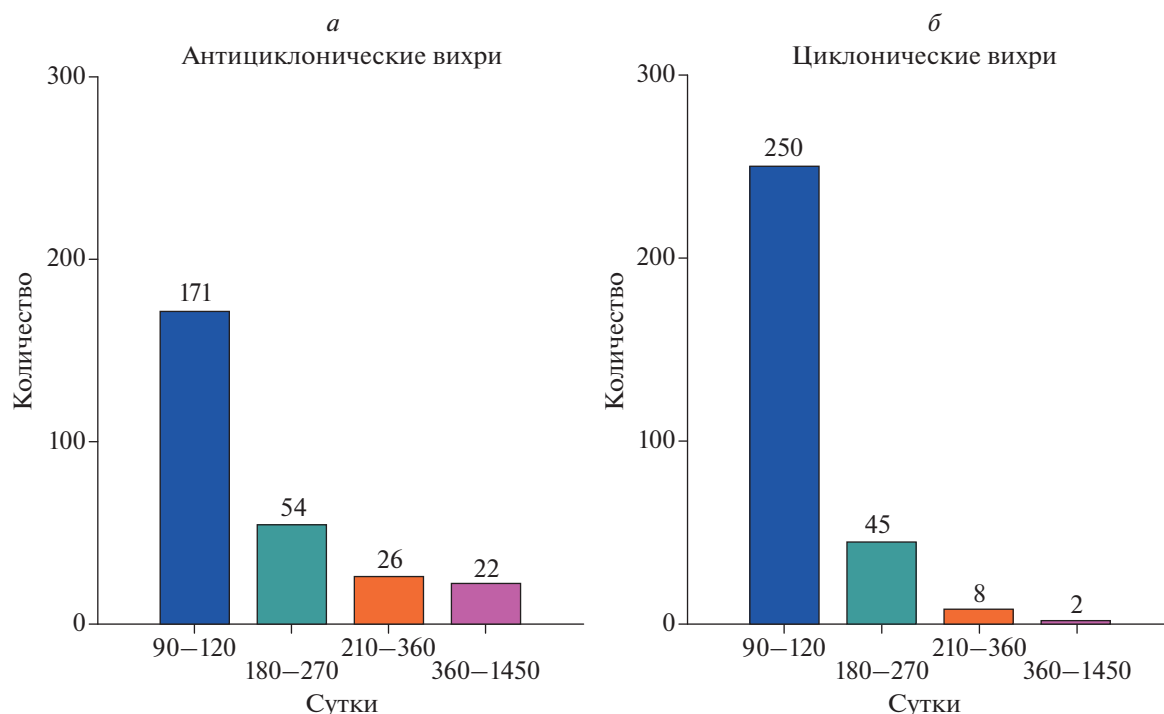


Рис. 5. Распределение количества антициклонических (а) и циклонических (б) вихрей в зависимости от времени существования (цвета на графиках соответствуют цветам на рис. 6).

циклонические вихри наблюдались на северной периферии основного циклонического круговорота и в северо-западной части моря.

Долгоживущие антициклоны Японского моря (более 271 сут, рис. 6 д, 6, ж) преимущественно концентрировались в районе Восточно-Корейского течения, в зоне субполярного фронта над возвышенностью Ямато и в области Цусимского течения над поднятием Оки. Эти районы в целом соответствуют положению квазистационарных вихрей-меандров основных течений Японского моря.

Средняя длина траекторий антициклонов составляла 446 км. Расстояние, пройденное вихрями, изменялось в диапазоне от 122 до 2626 км. Большая часть антициклонических вихрей перемещалась на расстояние 200–800 км (рис. 7, а). Меньшая часть антициклонов проходила расстояние 800–1200 км. Длина траекторий отдельных антициклонических вихрей превышала 1600 км (3 случая). Можно отметить, что наибольшие значения длин траекторий были получены для устойчивых антициклонических вихрей, связанных с квазистационарными меандрами Восточно-Корейского и Цусимского течений. Продолжительность существования этих мезомасштабных вихрей превышала 1 год.

Траектории движения короткоживущих циклонических вихрей (90–180 суток, рис. 6, б). значительно отличались от траекторий перемещения

антициклонов (рис. 6, а). В целом, на акватории моря выделялись области локальных концентраций траекторий циклонических вихревых образований, что может говорить о существовании квазистационарных зонах генерации вихревых структур этого знака вращения. В южной части Японского моря циклоны наблюдались как в области Восточно-Корейского и Цусимского течений, так и в субполярной фронтальной зоне (~40° с.ш.). Одна из зон сгущения траекторий циклонов была расположена в районе циклонического меандра ветви Восточно-Корейского течения, с которым связан вихрь Док. Распределение траекторий движения циклонических вихрей в юго-восточной части моря показывает, что этот тип вихревых образований оказывает существенное влияние на динамическую структуру вод Цусимского течения. Локальная область сгущения траекторий движения циклонических вихрей связана с зоной взаимодействия вод Цусимского течения и течения, связанного с субполярным фронтом (район, прилегающий к Сангарскому проливу). Существенные различия в распределении траекторий движения циклонических и антициклонических вихрей наблюдались в северной части Японского моря. В холодном субарктическом секторе моря отчетливо выделяются три района устойчивого сгущения траекторий движения циклонических вихревых образований, расположенные на ~41° с.ш., 131° в.д. (северо-запад-

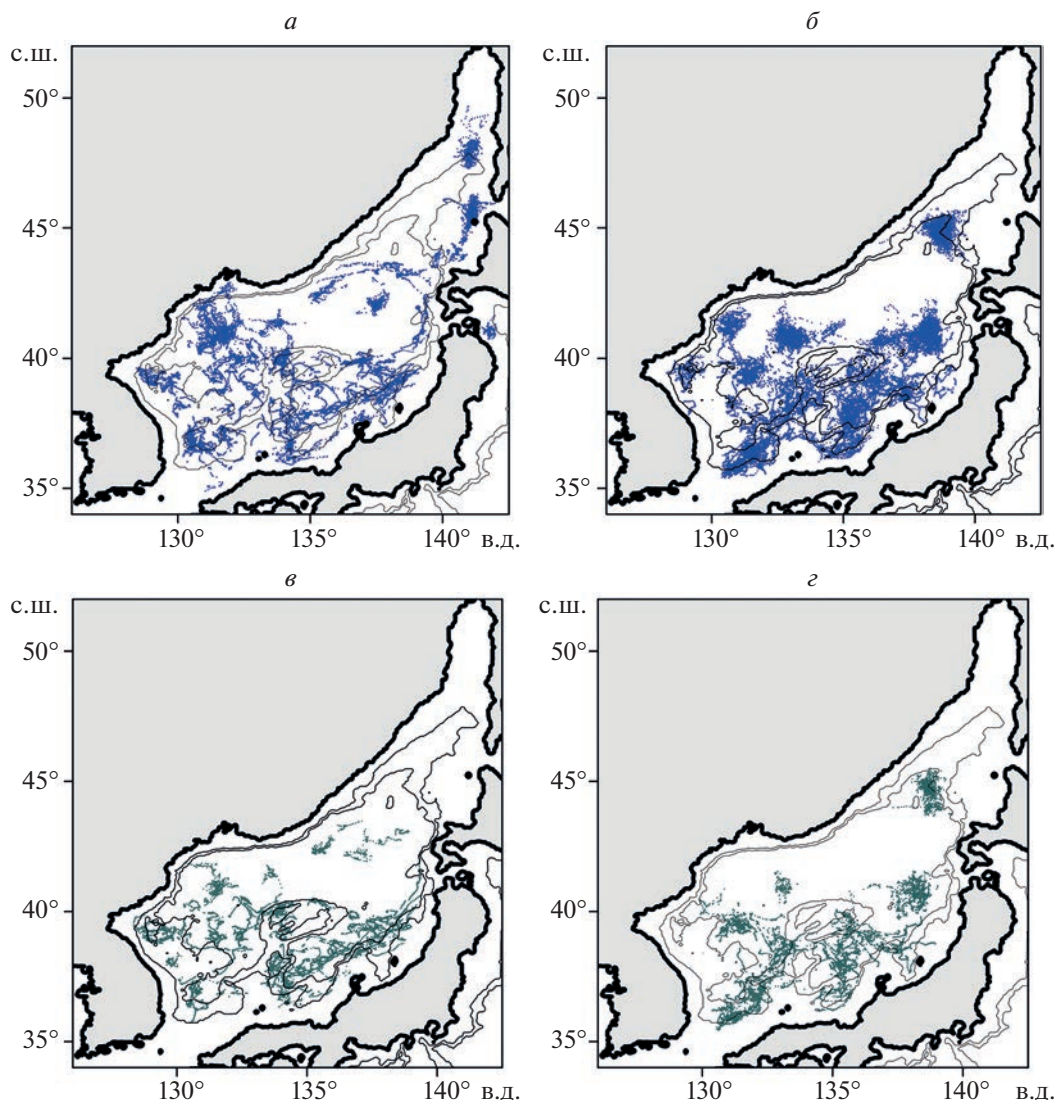


Рис. 6. Траектории движения антициклонических (*а, в, д, ж*, левая часть рисунка) и циклонических (*б, г, е, з*, правая часть рисунка) вихрей в Японском море в период с 1993 по 2021 гг. Выделялись только вихри со временем жизни более 90 сут: *а, б* – 90–180 сут; *в, г* – 181–270 сут; *д, е* – 271–365 сут; *ж, з* – 366 и более суток. Цвета на картах траекторий вихрей соответствует цвету на графиках, показанных на рис. 5.

ная часть моря), на $\sim 41^\circ$ с.ш., 132.5° в.д. (центральная часть моря) и на 44.5° с.ш., 139° в.д. (северная часть Японской глубоководной котловины). Первый район можно условно связать с Северо-Корейским течением, второй и третий – с областью циклонического круговорота Японской глубоководной котловины.

Основные особенности распределение траекторий движения циклонических вихрей с продолжительностью существования 181–270 сут (рис. 6, *г*) в целом соответствуют результатам, полученным при анализе движения короткоживущих циклонов (рис. 6, *б*). Можно отметить, что на этой карте отсутствуют циклоны, связанные с Северо-Корейским течением.

Пространственное распределение траекторий движения долгоживущих циклонов (271–365 суток, рис. 6, *е*) позволяет выделить устойчивые по времени существования вихревые структуры. К таким мезомасштабным вихрям относятся циклонический вихрь, расположенный к юго-западу от котловины Уллындо (вихрь Док). Зоны сгущения траекторий движения циклонов были связаны с субполярным фронтом. В районе Цусимского течения между поднятием Оки и Сангарским проливом можно выделить область с повышенной циклонической активностью, расположенную вблизи залива Вакаса, где периодически наблюдается циклонический вихрь, связанный с рециркуляцией вод прибрежной ветви

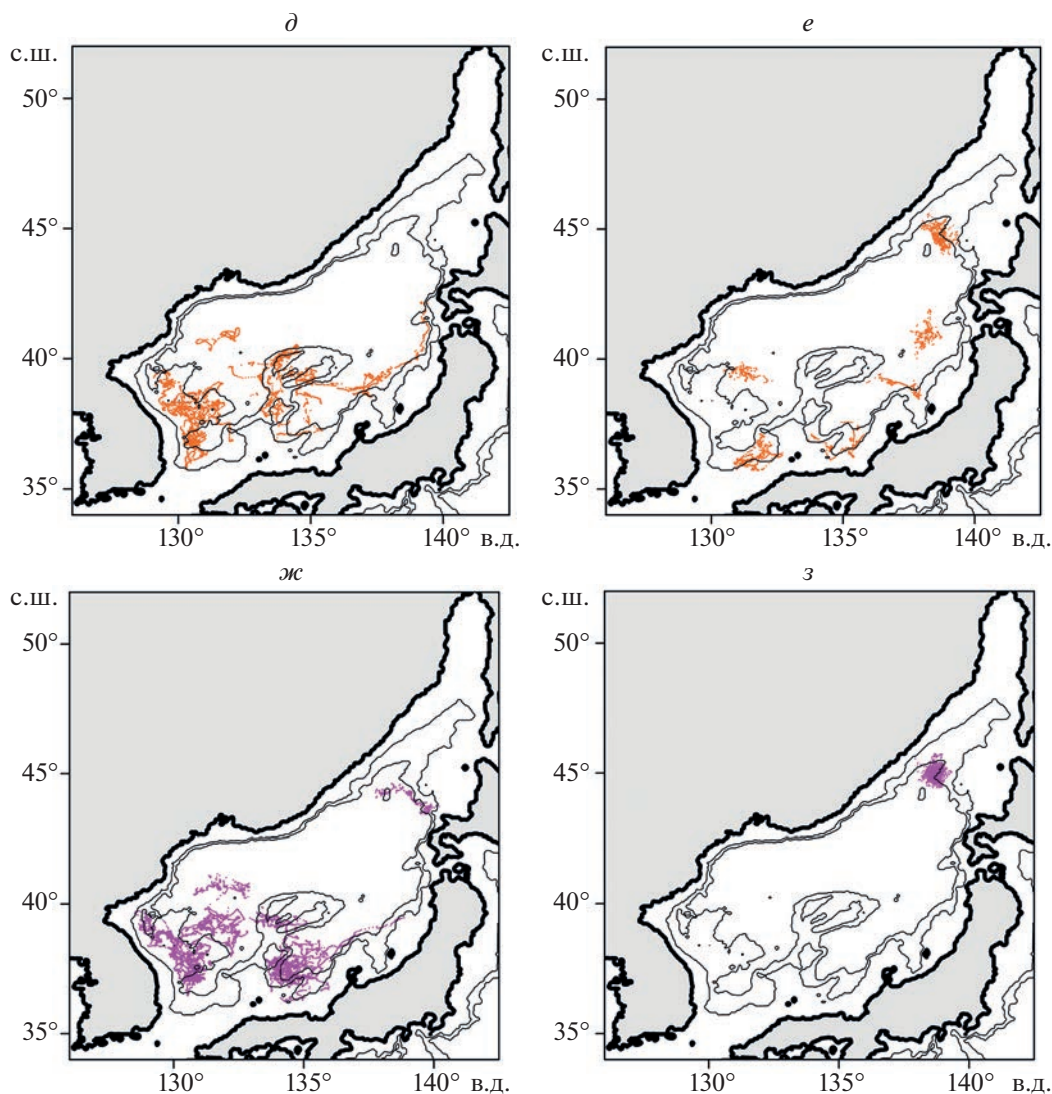


Рис. 6. Окончание

Цусимского течения. Наиболее устойчивая зона генерации циклонов в Японском море была расположена на северной периферии основного циклонического круговорота (рис. 6, з).

Гистограмма, показывающая распределение количества циклонических вихрей в зависимости от диапазона длины траекторий, представлена на рис. 7, б. Наибольшее количество вихрей имело длину траектории в диапазоне от 200 до 400 км. Только 4 циклонических вихря перемещались на расстояние, превышающее 1000 км. Максимальные длины траекторий были связаны с квазистационарным вихрем, расположенным на северной периферии основного циклонического круговорота (рис. 5, з, 5, ж). Средняя длина траекторий циклонов составляла 461 км, длина траекторий изменялась в диапазоне 177–3024 км. Среднее расстояние, пройденное циклоническими вихря-

ми, превышало среднюю длину траекторий движения антициклонов.

В целом, как антициклонические, так и циклонические вихри были связаны с основными течениями Японского моря. Меандрирование Восточно – Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения, связанное со взаимодействием этих потоков с неоднородностями рельефа дна (котловина Уллындо, Северо-Корейская возвышенность, подводные возвышенности Ямато и Оки) приводит к формированию квазистационарных меандров и мезомасштабных вихрей, которые оказывают влияние на общую циркуляцию вод Японского моря.

Результаты, полученные при помощи метода выделения вихревых структур в последовательных полях АДТ позволяют получить оценки параметров мезомасштабных вихрей в Японском

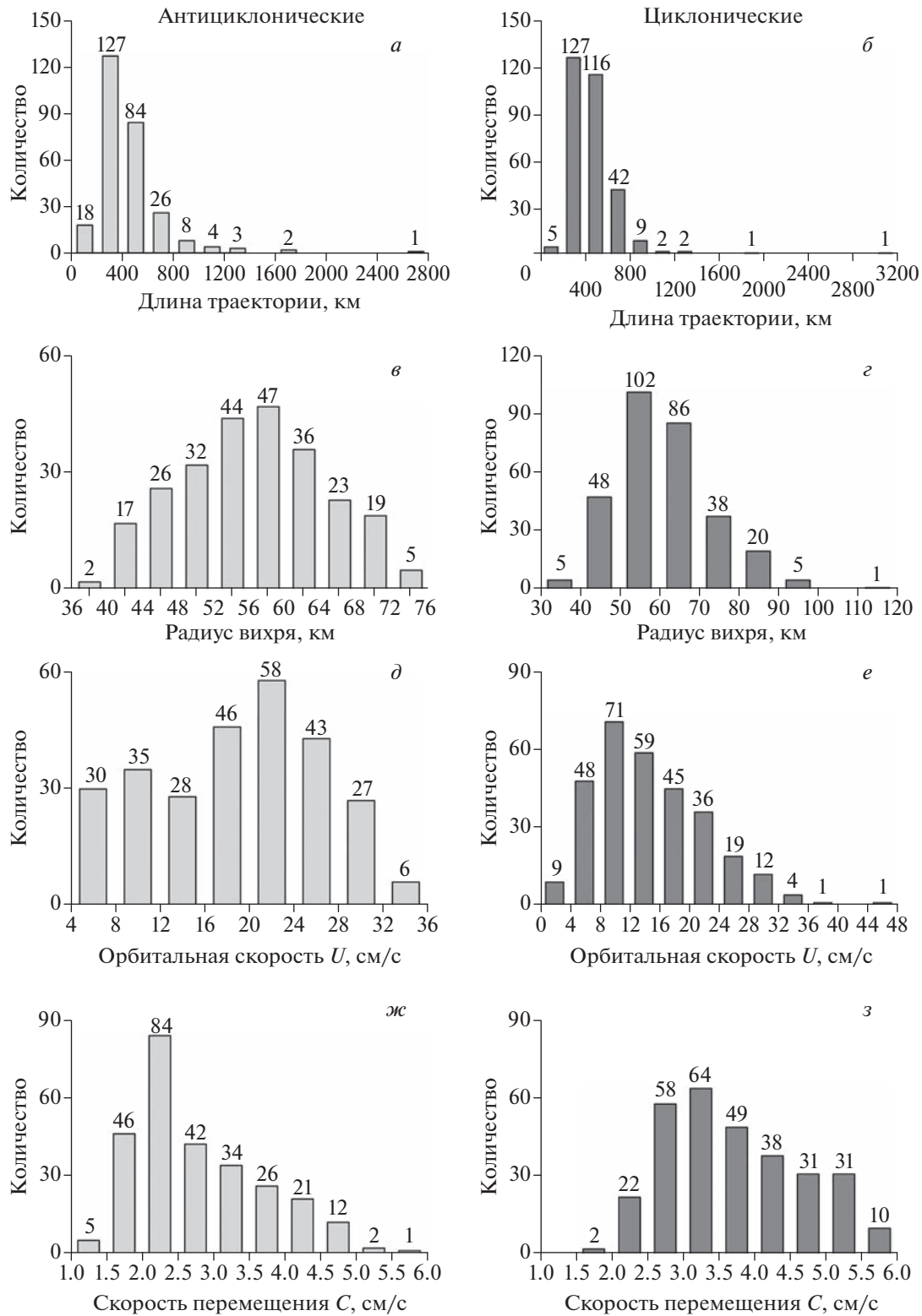


Рис. 7. Распределение количества вихрей в зависимости от длины траектории (а, б), радиуса (в, г), орбитальной скорости (д, е) и скорости перемещения (ж, з). Антициклонические вихри (а, в, д) выделены светлым цветом, циклонические (б, г, е) показаны серым цветом.

море. На рис. 7, *в–г*, *з* показаны распределения основных статистических характеристик мезомасштабных вихрей в Японском море. Антициклонические и циклонические вихри имели средний (эффективный) радиус и среднеквадратичное отклонение 58.4 ± 10.65 и 61.0 ± 12.2 км, соответственно. Значения радиуса для антициклонов и циклонов изменялись в диапазонах 38.0–93.0 и 38.1–115.0 км. Модальный интервал радиуса вихрей составлял 50–60 км как для антициклонических, так и для циклонических вихрей. Средняя орбитальная скорость геострофических течений на замкнутом контуре с наибольшими значениями скорости для антициклонов и циклонов была равна 19.0 ± 7.6 и 15.1 ± 7.5 см/с, максимальные значения составляли 35.9 и 45.0 см/с. Гистограммы имели максимум в диапазоне 20.0–24.0 см/с (антициклоны) и 8.0–12.0 см/с (циклоны). Средняя скорость перемещения антициклонов и циклонов вдоль траектории движения составляла 2.8 ± 0.9 и $3.7.0 \pm 0.95$ см/с, изменяясь в диапазонах 4.1–36.0 и 1.5–6.0 см/с. Модальный интервал скорости движения для антициклонических и циклонических вихрей составлял 2.0–2.5 и 3.0–3.5 см/с, соответственно.

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Результаты расчета траекторий движения вихрей позволяют установить положение районов формирования (первая точка траектории каждого выделенного вихря) и разрушения (последняя точка) мезомасштабных вихрей в Японском море. На рис. 8 показано распределение точек, в которых формировались и угасали антициклонические (рис. 8, *а*, 8, *б*) и циклонические (рис. 8, *в*, 8, *г*) мезомасштабные вихри. В южной части Японского моря формирование вихрей связано с Восточно-Корейским и Цусимским течениями (рис. 8, *а*, 8, *в*). В районе ветви Восточно-Корейского течения над котловиной Уллындо и вблизи Восточно-Корейского залива могли формироваться как антициклонические, так и циклонические вихревые образования. При этом в районе котловины Уллындо положение районов сгущения концентраций начальных точек антициклонов и циклонов соответствовало среднему положению вихря Уллындо (антициклонический меандр ветви Восточно-Корейского течения) и вихрю Док, связанному с циклоническим меандром этой ветви течения. В районе, прилегающем к Восточно-Корейскому заливу циклоны формировались над материковым склоном, а антициклоны — в области, прилегающей к Восточно-Корейскому плато (вихрь Вонсан). Область концентрации начальных точек антициклонических вихрей в зоне Цусимского течения наблюдалась

на северо-западном склоне поднятия Оки. Начальные точки циклонических вихрей были расположены вблизи побережья о. Хонсю между поднятием Оки и п-ом Ното (прибрежная ветвь Цусимского течения в заливе Вакаса). В целом можно отметить, что антициклонические и циклонические вихри формируются вдоль всего западного побережья Японии (о-ва Хонсю и Хоккайдо). Область сгущения начальных точек антициклонических вихрей была связана с западным склоном возвышенности Ямато. На восточном склоне возвышенности Ямато преимущественно наблюдались “новые” циклонические вихри. Формирование вихрей в этих районах связано с меандрированием и неустойчивостью субполярного фронтального течения. В северной части моря антициклонические вихри могли формироваться в районе залива Петра Великого, в области Северо-Корейского течения, в северо-западной части моря и на периферии основного циклонического круговорота. “Новые” антициклонические вихри наблюдались в районе пролива Лаперуза и в Татарском проливе. Начальные точки циклонических вихрей в субарктическом секторе были в основном сконцентрированы в северо-западном секторе моря и на северном склоне глубоководной Японской котловины.

Характер распределения точек угасания антициклонических и циклонических вихрей (рис. 8, *б*, 8, *г*) в общих чертах совпадает с картами, на которых показаны точки формирования мезомасштабных вихревых образований (рис. 8, *а*, 8, *в*). Мезомасштабные вихри в основном формировались, перемещались и разрушались в зоне основных течений Японского моря. При этом области с высокой концентрацией точек разрушения антициклонов приблизительно соответствовали районам с наиболее активным вихреобразованием. Это показывает, что устойчивые вихри Восточно-Корейского течения (вихри Уллындо, Док и вихрь Вонсан) угасали вблизи районов своего формирования. В зоне Цусимского течения вихри устойчиво формировались и разрушались над поднятием Оки (вихрь Оки) и вдоль восточного побережья островов Хонсю и Хоккайдо. Можно выделить зону активного разрушения антициклонических вихрей в северо-западной части моря ($40\text{--}42^\circ$ с.ш., $130\text{--}133^\circ$ в.д.), в которой угасали вихри северо-западного антициклонического меандра субполярного фронта. Больше количество циклонов формировалось и угасало в северной части Японской глубоководной котловины на периферии основного циклонического круговорота. В этом районе на карте средних абсолютных геострофических течений наблюдался устойчивый мезомасштабный циклонический вихрь (рис. 2).

На рис. 8 цветом показано пространственное распределение новых и исчезнувших антициклонических и циклонических вихрей по сезонам.

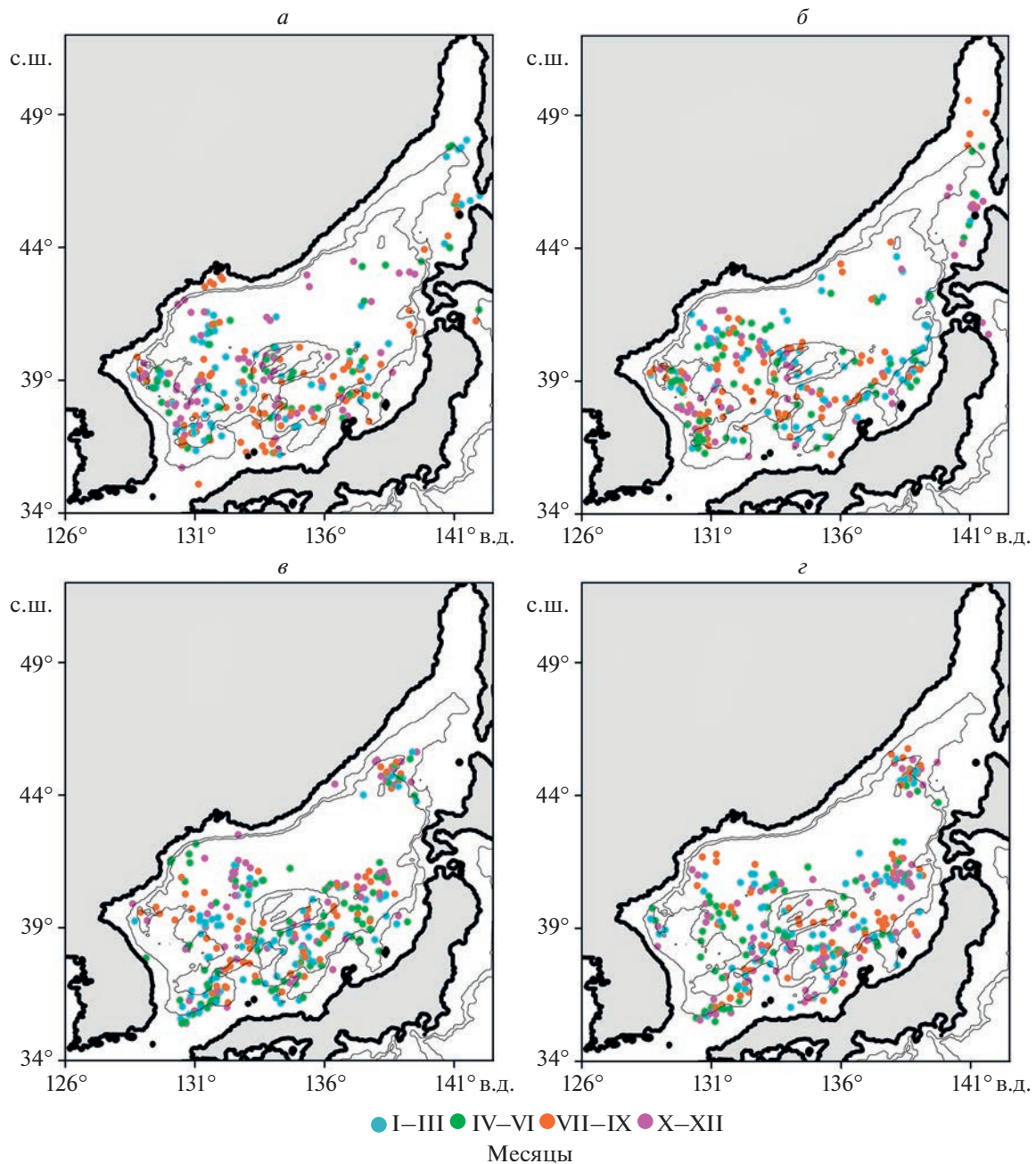


Рис. 8. Положение начальных (а) и конечных (б) точек траекторий антициклонических и начальных (в)/конечных (г) точек циклонических вихрей. Цветом выделены сезоны формирования и разрушения вихревых структур.

Максимальное число зарегистрированных случаев формирования и разрушения антициклонов приходится на июль–сентябрь, т.е. на период с высокими значениями поступления вод через Корейский пролив. Это показывает, что сезонные изменения объемного переноса вод через этот пролив оказывают влияние на процессы образования/разрушения антициклонических мезомасштабных вихрей в южной части Японского моря. На первую половину года (январь–июнь)

приходится наибольшее число зарегистрированных случаев возникновения циклонов. Основная часть циклонических вихрей разрушается в холодную половину года (октябрь–март).

На рис. 9 показано распределение по годам количества сформировавшихся и исчезнувших антициклонических (а) и циклонических (б) вихрей. В период наблюдений (1993–2019 гг.) в течение года могло формироваться от 6 до 17 “новых” антициклонических вихрей, при этом количество

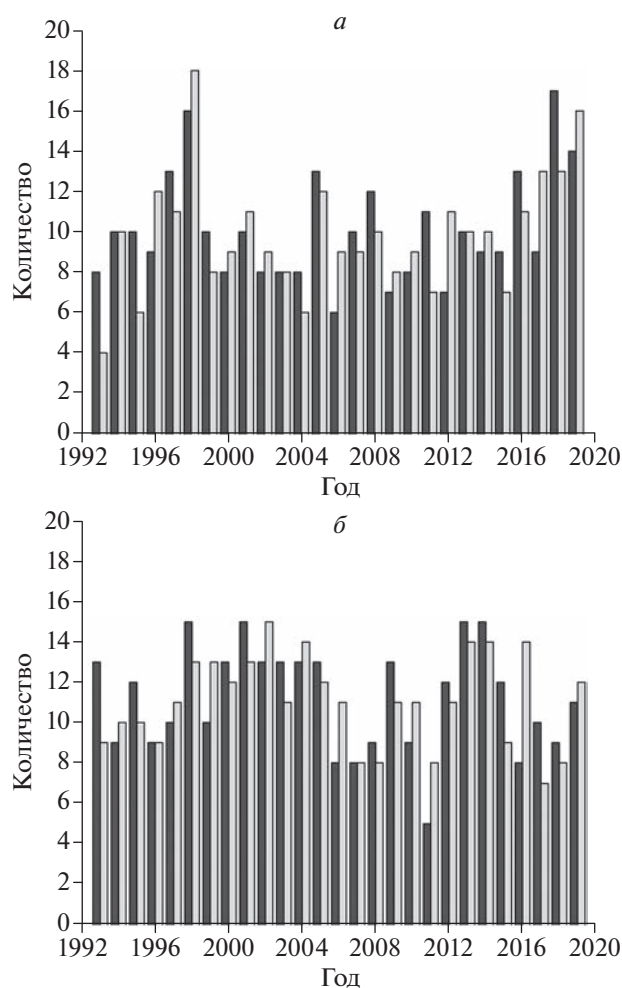


Рис. 9. Межгодовая изменчивость количества антициклонических (а) и циклонических (б) мезомасштабных вихрей в Японском море. Вновь появившиеся вихри выделены темным цветом, исчезнувшие вихри показаны серым цветом.

исчезнувших антициклонов изменялось в диапазоне от 4 до 18. Соответствующие диапазоны значений количества циклонических вихрей составляли 5–15 (новые вихри) и 7–15 (исчезнувшие вихри). Можно отметить, что вихревая активность, связанная с антициклонами усиливалась в 1997–1998 и 2018–2019 гг. Наименьшее количество новых циклонических вихрей было зарегистрировано в 2011 г. Качественное сравнение результатов, полученных при помощи метода выделения мезомасштабных вихрей в полях абсолютной динамической топографии с временными сериями оценок поступления вод через Корейский пролив (Nap et al., 2020) показало, что количество новых и исчезнувших вихрей прямо не связано с изменчивостью объемного переноса в этом проливе. Это показывает, что вихреобразование определяется рядом факторов, которые влияют на устойчивость

течений в Японском море. К физическим процессам, определяющим формирование мезомасштабных вихрей относятся межгодовые изменения суммарного потока тепла и интенсивности муссонной атмосферной циркуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Японское море относится к хорошо изученным районам океана. В последние десятилетия для изучения динамики вод Японского моря широко использовались данные спутниковых измерений. Спутниковые изображения в ИК диапазоне спектра показали, что в Японском море наблюдается высокий уровень вихревой активности. Статистический анализ данных альтиметрических наблюдений (аномалии уровня моря и скорости поверхностных геострофических течений) внес существенный вклад в исследования энергоактивных зон и мезомасштабных вихрей Японского моря.

Карты-схемы средних течений, построенные на основе массивов данных спутниковых альтиметрических наблюдений (абсолютные геострофические течения) в основном соответствуют существующим представлениям об общей циркуляции вод Японского моря. Детальный анализ векторного поля течений показал, что меандрирование Восточно-Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения, вызванное взаимодействием этих потоков с рельефом дна приводит к формированию квазистационарных меандров, с которыми связаны устойчивые мезомасштабные вихри. В настоящее время спутниковая альтиметрия рассматривается как один из основных методов исследования мезомасштабной изменчивости в океане. Региональная база данных, созданная на основе глобального массива (AVISO, “Атлас...”) позволила рассмотреть траектории движения и статистические характеристики мезомасштабных вихрей в Японском море. В работе выполнено сравнение данных спутниковой альтиметрии и прямых океанографических наблюдений. Положение устойчивых мезомасштабных вихрей по океанографическим данным (лето 1999 г) в целом соответствовало результатам, полученным при помощи метода идентификации вихревых структур в полях ADT.

За период альтиметрических наблюдений (1993–2020 гг.) было выделено 578 вихрей с продолжительностью существования более 90 сут, которые оказывают влияние на сезонную изменчивость структуры и динамики вод Японского моря. В Японском море преобладали циклонические вихри (305 вихря), количество антициклонов было равно 273. В среднем в течении года формировалось ~12 циклонических и ~11 антициклонических вихрей. Антициклонические и циклонические вихри имели средний радиус 58.4

и 61.0 км, соответственно. Средняя орбитальная скорость геострофических течений была равна 19.0 и 15.1 см/с, средняя скорость перемещения антициклонов и циклонов вдоль траектории движения составляла 2.8 и 3.7.0 см/с.

Анализ средней циркуляции вод и результаты, полученные при анализе пространственного распределения вихрей, позволили сделать вывод о том, что устойчивые антициклонические и циклонические мезомасштабные вихри в Японском море связаны с основными квазистационарными меандрами Восточно-Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения. Вихри-меандры выделялись как области сгущения траекторий движения вихрей и как районы с высокой концентрацией начальных и конечных точек траекторий движения вихрей (области формирование и разрушение вихревых структур).

Течения южной части Японского моря определяются как поверхностно — интенсифицированные (глубина Корейского пролива составляет ~200 м). В глубоководной части моря влияние Восточно-Корейского и Цусимского течений прослеживается до больших глубин, поэтому на циркуляцию вод оказывает влияние совместный эффект бароклинности и рельефа дна (СЭБИР). Восточно-Корейское течение разделяется на две ветви в районе о. Уллындо (37—38° с.ш.). Воды первой ветви формируют квазистационарный антициклонический меандр над котловиной Уллындо (вихрь Уллындо) и циклонический меандр в районе о. Док (вихрь Док). Основной поток Восточно-Корейского течения продолжает движение в северном направлении вдоль побережья Корейского полуострова. Восточно-Корейское течение относится к категории западных пограничных течений, поэтому в результате бета-эффекта этот поток отрывается от побережья ~ на 39° с.ш., при этом формируется антициклонический вихрь-меандр в районе Восточно-Корейского залива (вихрь Вонсан). Воды Восточно-Корейского течения участвуют в формировании северо-западного меандра субполярного фронта, с которым связан устойчивый антициклонический вихрь. Взаимодействие субполярного фронтального течения с возвышенностью Ямато приводит к формированию меандров и вихрей. В области антициклонического меандра, расположенного над западным склоном возвышенности Ямато наблюдается устойчивый мезомасштабный вихрь. Меандрирование Цусимского течения определяет формирование антициклонических вихрей в районе котловины Ямато. В юго-восточной части Японского моря Цусимское течение огибает поднятие Оки, что приводит к формированию хорошо выраженного антициклонического вихря-меандра (вихрь Оки). Относительно устойчивый циклонический вихрь, связанный с прибрежной ветвью Цусимского течения наблюдает-

ся в районе залива Вакаса. Взаимодействие вод Цусимского течения с п-овом Осима (юго-западное побережье о. Хоккайдо) вызывает меандрирование этого потока и приводит к генерации антициклонических вихрей, которые перемещаются в западном направлении по северной периферии основного циклонического круговорота (42—43° с.ш.). Наиболее устойчивый циклонический вихрь расположен над северным склоном Японской глубоководной котловины в зоне взаимодействия Цусимского и Приморского течений.

В целом, совместный анализ средней циркуляции вод и данных о пространственном распределении мезомасштабных вихрей позволяет сделать вывод о том, что в Японском море устойчивые вихри связаны с квазистационарными меандрами Восточно-Корейского течения, субполярного фронта и Цусимского течения. В свою очередь, меандры формируются в результате взаимодействия основных течений с рельефом дна (глубоководные впадины и подводные возвышенности).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках гос. задания ТОИ ДВО РАН по теме № 6, рег. № 121021700346-7.

БЛАГОДАРНОСТИ

Спутниковое ИК-изображение (рис. 3) получено в ИАПУ ДВО РАН.

The altimetric Mesoscale Eddy Trajectory Atlas product (META3.1exp DT allsat, DOI: 10.24400/527896/a01-2021.001; Pegliasco et al., 2021a) was produced by SSALTO/DUACS and distributed by AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) with support from CNES, in collaboration with IMEDEA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66—83.
- Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3—15.
- Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // В кн. Дальневосточные моря. Т. 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450—473.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 42—57.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И., Ванин Н.С. Спутниковые наблюдения синоптических вихрей и геострофическая циркуляция вод Японского моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 28—40.

- Никитин А.А., Дьяков Б.С., Капиштер А.В. Приморское течение на стандартных разрезах и спутниковых изображениях Японского моря // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 31–43.
- Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 100–104.
- Трусенкова О.О. Оценка изменчивости вихревой кинетической энергии в Японском море по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. С. 12–21.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток : ДВО АН СССР, 1991. 176 с.
- Han M., Cho Y.-K., Kang H.-W., Nam S. Decadal changes in meridional overturning circulation in the East Sea (Sea of Japan) // J. Phys. Oceanogr. 2020. V. 50. № 6. P. 1773–1791.
- Hogan P.J., Hurlburt H.E. Why do intrathermocline eddies form in the Japan/East Sea? A modeling perspective // Oceanogr. 2006. V. 19. № 3. P. 134–143.
- Isoda Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K. Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise // Umi no Kenkyu. 1992. V. 1. P. 141–151 (in Japanese with English abstract).
- Isoda Y., Nishihara M. Behavior of warm eddies in the Japan Sea // Umi to sora. 1992. V. 67. № 1. P. 231–243.
- Isoda Y. Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // J. Oceanogr. 1994. V. 50. № 1. P. 1–16.
- Kim T., Jo H.-J., Moon J.H. Occurrence and evolution of mesoscale thermodynamic phenomena in the northern part of the East Sea (Japan Sea) derived from satellite altimeter // Remote Sens. 2021. V. 13. № 6. P. 1071. <https://doi.org/10.3390/rs13061071>
- Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1547–1563.
- Lee D.-K., Niiler P. Eddies in the southwestern East/Japan Sea // Deep Sea Res. I. 2010. V. 57. № 10. P. 1233–1242.
- Lee G.M., Thomas L. N., Yoshikawa Y. Intermediate water formation at the Japan/East Sea Subpolar front // Oceanogr. 2006. V. 19. № 3. P. 110–121.
- Mason E., Pascual A., McWilliams J.C. A new sea surface height–based code for oceanic mesoscale eddy tracking // J. Atmospheric Ocean. Technol. 2014. V. 31. P. 1181–1188.
- Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // J. Oceanogr. 2000. V. 56. P. 449–462.
- Morimoto A., Yanagi T. Variability of sea surface circulation in the Japan Sea // J. Oceanogr. 2001. V. 57. № 1. P. 1–13.
- Mitchell D.A., Watts D.R., Wimbush M. et al. // Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. P. 1617–1638.
- Mitchell D.A., Teague W.J., Wimbush M., Watts D.R., Sutyrin G.G. The Dok Cold Eddy // J. Phys. Oceanogr. 2005. V. 35. P. 273–288.
- Min D.H., Warner M.J. Basin-wide circulation and ventilation study in the East Sea (Sea of Japan) using chlorofluorocarbons. Deep-Sea Research II, 2005. V. 52. № 11–13. P. 1580–1616.
- Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*, eds K.-I. Chang, C.-I. Zhang, C. Park et al. Springer, 2016. 460 p.
- Ou H.W., Gordon A. Subduction along a midocean front and the generation of intrathermocline eddies: a theoretical study // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 6. P. 1975–1986.
- Park A.K., Chung J.Y. Spatial and temporal scale variations of sea surface temperature in the East Sea using NOAA/AVHRR data // J. Oceanogr. 1999. № 1. P. 271–288.
- Park K.-A., Chung J.Y., Kim K. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L07304. <https://doi.org/10.1029/2004GL019424>
- Pegliasco C., Delepouille A., Faugère Y. Mesoscale eddy trajectories atlas delayed-time all satellites: version META3.1exp DT allsat. <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2021.001>. 2021
- Pegliasco C., Delepouille A., Manson E., Morrow R., Faugère Y., Dibarboure G. META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // Earth Syst. Sci. Data, 2022. V. 14. P. 1087–1107. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // Nonlinear Processes in Geophysics. 2017. V. 24. P. 89–99.
- Prelle R.H., Hogan P.J. Oceanography of the Sea of Okhotsk and the Japan/East Seas. The Sea. 1998. V. 11. ed. by A. R. Robinson and K. H. Brink. John Wiley and Sons Inc. P. 429–481.
- Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C.M., Bower A., Furey H.H., Talley L.D. Japan/East Sea Intra-thermocline eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 6. P. 1960–1974.
- Shin H.R., Shin C.W., Kim C. et al. Movement and structural variations of warm eddy WE92 for three years in the western East/Japan Sea // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1742–1762.
- Taburet G., Sanchez-Roman A., Ballarotta M., Pujol M.-I., Legeais J.-F., Fournier F., Faugere Y., Dibarboure G. DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products // Ocean Sci., 2019. V. 15. P. 1207–1224.
- Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z. Observations of eddies in the Japan Basin Interior // J. Oceanogr. 1999. V. 55. № 1. P. 237–246.
- Talley L.D., Min D.-H., Lobanov V.B., Luchin V.A., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Sherbina A.Y., Tishchenko P.Y., Zhabin I. A. Japan/East Sea Water Masses and Their Relation to the Sea's Circulation // Oceanography. 2006. V. 19. № 3. P. 32–49.
- Trusenкова O., Kaplunenkov D. Intra-annual sea level fluctuations and variability of mesoscale processes in the Northern Japan/East Sea from satellite altimetry data // Front. Mar. Sci. 2022. P. 866328–866460. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.866328>
- Yabe I., Kawaguch Y., Wagawa T., Fujio S. Anatomical study of Tsushima Warm Current: Determination of principal pathways and its variation // Prog. in Oceanogr. 2021. 194. 102590. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102590>

Zhao N., Manda A., Han Z. Frontogenesis and frontolysis of the subpolar front in the surface mixed layer of the Japan

Sea // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 1498–1509. <https://doi.org/10.1002/2013JC009419>

Circulation and Mesoscale Eddies in the Sea of Japan from Satellite Altimetry Data

I. A. Zhabin¹, E. V. Dmitrieva¹, S. N. Taranova¹, and V. B. Lobanov¹

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

The spatial distribution and seasonal variability of mesoscale eddies in the Sea of Japan were investigated based on the regional database created from the AVISO Atlas of Mesoscale Eddies (1993–2020). The database contains information about the trajectories and parameters of mesoscale eddies in the ocean. The eddies detection method is based on the analysis of altimetric maps of absolute dynamic topography. A total of 578 eddies with a lifetime of more than 90 days were identified (273 anticyclonic and 305 cyclonic). The average lifetime for the Sea of Japan regional data set of eddies is 202 days for anticyclonic and 143 days for cyclonic and mean radius of 59 ± 11 km for anticyclonic and 61.0 ± 12 km for cyclonic. The mean speed of anticyclones and cyclones along their trajectories was 2.8 and 3.7 cm/s, the average orbital velocities of geostrophic currents were 19.0 and 15.1 cm/s, respectively. The maximum number of cases of formation and destruction of anticyclones falls in July–September during the period with high values of water inflow through the Korea Strait. Most of the cyclonic eddies are generated between January and June and decay the cold half of the year (October–March). The joint analysis of maps of the mean surface circulation in the Sea of Japan (satellite altimetry data) and the spatial distribution of mesoscale eddy showed that the stable eddies of the Sea of Japan are associated with the quasi-stationary meanders of the of the East Korea current, Subpolar Front, and Tsushima current. The position of meanders is mainly determined by the interaction of the currents with the bottom topography.

Keywords: Sea of Japan, circulation, currents, mesoscale eddies, meanders, satellite altimetry, absolute dynamic topography

REFERENCES

- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Ostrovskii A.G. Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreyfuyushchikh buev) [Surface circulation of the Japan Sea (satellite information and drifters data)] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 1998. № 1. P. 66–83. (In Russian).
- Han M., Cho Y.-K., Kang H.-W., Nam S. Decadal changes in meridional overturning circulation in the East Sea (Sea of Japan) // J. Phys. Oceanogr. 2020. V. 50. № 6. P. 1773–1791.
- Hogan P.J., Hurlburt H.E. Why do intrathermocline eddies form in the Japan/East Sea? A modeling perspective // Oceanogr. 2006. V. 19. № 3. P. 134–143.
- Isoda, Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K. Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise // Umi no Kenkyu. 1992. V. 1. P. 141–151 (in Japanese with English abstract).
- Isoda Y., Nishihara M. Behavior of warm eddies in the Japan Sea // Umi to sora. 1992. V. 67. № 1. P. 231–243.
- Isoda Y. Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // J. Oceanogr. 1994. V. 50. № 1. P. 1–16.
- Kim T., Jo H.-J., Moon J.H. Occurrence and evolution of mesoscale thermodynamic phenomena in the northern part of the East Sea (Japan Sea) derived from satellite altimeter // Remote Sens. 2021. V. 13. № 6. P. 1071. <https://doi.org/10.3390/rs13061071>
- Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B. Mesoscale Eddies in the Area of Peter the Great Bay according to Satellite Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. №. 9. P. 939–951.
- Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1547–1563.
- Lee D.-K., Niiler P. Eddies in the southwestern East/Japan Sea // Deep Sea Res. I. 2010. V. 57. № 10. P. 1233–1242.
- Lee G.M., Thomas L. N., Yoshikawa Y. Intermediate water formation at the Japan/East Sea Subpolar front // Oceanogr. 2006. V. 19. №. 3. P. 110–121.
- Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A. N., Tishchenko P., Talley L.D. Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrei severnoi chasti Yaponskogo morya [Structure and dynamics of mesoscale eddies in the northern Japan Sea]. Dal'nevostochnye Morya Rossii, Kn. 1, Okeanologicheskie Issledovaniya [Far Eastern Seas of Russia, Book 1, Oceanological Research]. Moscow: Nauka, 2007. P. 450–473. (In Russian).
- Mason E., Pascual A., McWilliams J.C. A new sea surface height–based code for oceanic mesoscale eddy tracking // J. Atmospheric Ocean. Technol. 2014. V. 31. P. 1181–1188.
- Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // J. Oceanogr., 2000. V. 56. P. 449–462.
- Morimoto A., Yanagi T. Variability of sea surface circulation in the Japan Sea // J. Oceanogr. 2001. V. 57. № 1. P. 1–13.
- Mitchell D.A., Watts D.R., Wimbush M. et al. // Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. Deep-Sea Res. II 2005. V. 52. P. 1617–1638.
- Mitchell D.A., Teague W.J., Wimbush M., Watts D.R., Sutyrin G.G. The Dok Cold Eddy // J. Phys. Oceanogr. 2005. V. 35. P. 273–288.
- Min D.H., Warner M.J. Basin-wide circulation and ventilation study in the East Sea (Sea of Japan) using chlorofluo-

- rocarbontracers. Deep-Sea Research II, 2005. V. 52. № 11–13. P. 1580–1616.
- Nikitin A.A., Yurasov G.I. Sinopticheskie vikhri Yaponskogo morya po sputnikovym dannym [Synoptic eddies in the Sea of Japan according to satellite observations] // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2008. № 5. P. 42–57. (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I., Vanin N.S. Satellite observations of synoptic eddies and the geostrophic circulation of the Sea of Japan waters // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48. № 9. P. 980–992.
- Nikitin A.A., Djakov B.S., Kapshiter A.V. The Primorskoe Current at standard sections and in satellite images of the Sea of Japan's surface // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. № 12. P. 1605–1614.
- Oceanography of the East Sea (Japan Sea). eds K.-I. Chang, C.-I. Zhang, C. Park et al. Springer, 2016. 460 p.
- Ou H.W., Gordon A. Subduction along a midocean front and the generation of intrathermocline eddies: a theoretical study // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 6. P. 1975–1986.
- Park K.-A., Chung J.Y., Kim K. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L07304. <https://doi.org/10.1029/2004GL019424>
- Park A. K., Chung J. Y. Spatial and temporal scale variations of sea surface temperature in the East Sea using NOAA/AVHRR data // J. Oceanogr. 1999. № 1. P. 271–288.
- Pegliasco C., Delepoulle A., Faugère Y. Mesoscale eddy trajectories atlas delayed-time all satellites: version META3.1exp DT allsat. <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2021.001>. 2021
- Pegliasco C., Delepoulle A., Manson E., Morrow R., Faugère Y., Dibarbouré G. META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // Earth Syst. Sci. Data, 2022. V. 14. P. 1087–1107.
- Ponomarev V.I., Faiman P.A., Dubina V.A., Ladychenko S. Yu., Lobanov V.B. Sinopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym materikovym sklonom i shelfom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezultaty distantsionnykh nablyudeniy) [Mesoscale eddy dynamics over the northwest Japan Sea continental slope and shelf (simulation and remote sensing results)] // Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2011. V. 8. № 2. P. 100–104. (In Russian).
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // Nonlinear Processes in Geophysics. 2017. V. 24. P. 89–99.
- Prelle R.H., Hogan P.J. Oceanography of the Sea of Okhotsk and the Japan/East Seas. The Sea. 1998. V. 11. ed. by A.R. Robinson and K. H. Brink. John Wiley and Sons Inc. P. 429–481.
- Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C.M., Bower A., Furey H.H., Talley L.D. Japan/East Sea Intra-thermocline eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 6. P. 1960–1974.
- Shin H.R., Shin C.W., Kim C. et al. Movement and structural variations of warm eddy WE92 for three years in the western East/Japan Sea // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1742–1762.
- Taburet G., Sanchez-Roman A., Ballarotta M., Pujol M.-I., Legeais J.-F., Fournier F., Faugère Y., Dibarbouré G. DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products // Ocean Sci., 2019. V. 15. P. 1207–1224.
- Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z. Observations of eddies in the Japan Basin Interior // J. Oceanogr. 1999. V. 55. № 1. P. 237–246.
- Talley L.D., Min D.-H., Lobanov V.B., Luchin V.A., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Sherbina A.Y., Tishchenko P.Y., Zhabin I.A. Japan/East Sea Water Masses and Their Relation to the Sea's Circulation // Oceanography. 2006. V. 19. № 3. P. 32–49.
- Trusenkova O.O. Variability of eddy kinetic energy in the Sea of Japan from satellite altimetry data // Oceanology 2014. V. 54. № 2. P. 8–16.
- Trusenkova O., Kaplunenko D. Intra-annual sea level fluctuations and variability of mesoscale processes in the Northern Japan/East Sea from satellite altimetry data // Front. Mar. Sci. 2022. P. 866328–866460. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.866328>
- Yabe I., Kawaguchi Y., Wagawa T., Fujio S. Anatomical study of Tsushima Warm Current: Determination of principal pathways and its variation // Prog. in Oceanogr. 2021. 194. 102590. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102590>, 2021.
- Yurasov G.I., Yarichin V.G. Tcheniya Yaponskogo morya [Currents of the Sea of Japan]. Vladivostok: DVO AN USSR. 1991. 176 p. (In Russian).
- Zhao N., Manda A., Han Z. Frontogenesis and frontolysis of the subpolar front in the surface mixed layer of the Japan Sea // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 1498–1509. <https://doi.org/10.1002/2013JC009419>