

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СРЕДНЯЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ДРИФТЕРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2025 г. И. А. Жабин¹ *, С. Н. Таранова¹, Н. Б. Лукьянова¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

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

Поступила в редакцию 14.11.2024 г.

Сведения о средних течениях в Японском море необходимы для понимания региональных климатических изменений. Среднее положение и скорости основных течений Японского моря были определены по данным дрейфтерных наблюдений (Глобальная дрейфтерная программа, 1988–2023 гг.) и результатам расчета абсолютных геострофических течений (спутниковая альтиметрия AVISO, 1993–2022 гг.). На картах, построенных по данным дрейфтерных и спутниковых наблюдений отчетливо выделяются Цусимское теплое течение (ЦТТ), Восточно-Корейское теплое течение (ВКТТ), Приморское течение, Субполярное фронтальное течение и циклонический круговорот в северной части моря. Детальный анализ поля поверхностных течений показал, что ВКТТ в западной части Японского моря образует три антициклонических меандра. Хорошо выраженный меандр (восточная ветвь) этого течения наблюдается в районе котловины Уллындо. Второй меандр формируется в результате отделения течения от побережья в районе Восточно-Корейского залива. Третий антициклонический меандр наблюдается в северо-западной части Японского моря. Приморское течение отрывается от побережья Приморья в районе залива Петра Великого и следует по направлению к Субполярному фронту. Взаимодействие Приморского течения с северо-западным меандром ВКТТ приводит к формированию северо-западного динамического фронта. Результаты анализа поверхностной циркуляции показали, что ЦТТ делится на прибрежную и морскую ветви. Основной морской поток ЦТТ в свою очередь разделяется на три ветви. Формирование Субполярного фронтального течения в западной части моря определяется водами ВКТТ. Приморское течение влияет на северную динамическую границу этой фронтальной зоны. В центральной и восточной частях Японского моря Субполярный фронт связан с ЦТТ. Северный циклонический круговорот формируется продолжением ЦТТ у побережья о. Хоккайдо, Приморским течением и Субполярным фронтальным течением. Среднее положение основных поверхностных течений связано с рельефом дна Японского моря. Представлена схема поверхностной циркуляции вод, полученная с учетом данных дрейфтерных и спутниковых альтиметрических наблюдений.

Ключевые слова: Японское море, средняя циркуляция, течения, дрейфтеры, спутниковая альтиметрия, абсолютные геострофические течения

DOI: 10.7868/S3034540525030063

ВВЕДЕНИЕ

Японское море относится к окраинным морям северо-западной части Тихого океана. Четыре мелководных пролива – Корейский (Цусимский), Сангарский (Цугару), Лаперуза (Соя) и Татарский соединяют Японское море с Тихим океаном, Восточно-Китайским и Охотским морями. В рельефе дна Японского моря выделяют котловины Уллындо, Ямато и Японскую котловину. В центральной части моря расположена возвышенность Ямато, в западной – Восточно-Корейская возвышенность (Восточно-Корейское плато), в юго-восточной – поднятие Оки (рис. 1).

Японское море вызывает интерес как своеобразный уменьшенный прототип океана. В Японском море можно проводить исследования ветровой и термохалинной циркуляции вод, Субполярного (субарктического) климатического фронта, мезомасштабной изменчивости, глубокой конвекции и других процессов, определяющих структуру и динамику вод океана. Сведения о средних течениях в Японском море необходимы для понимания региональных климатических изменений.

Общая циркуляция вод Японского моря определяется постоянными течениями (Юрасов, Яричин, 1991; Talley et al., 2006; Chang et al., 2016). Основные

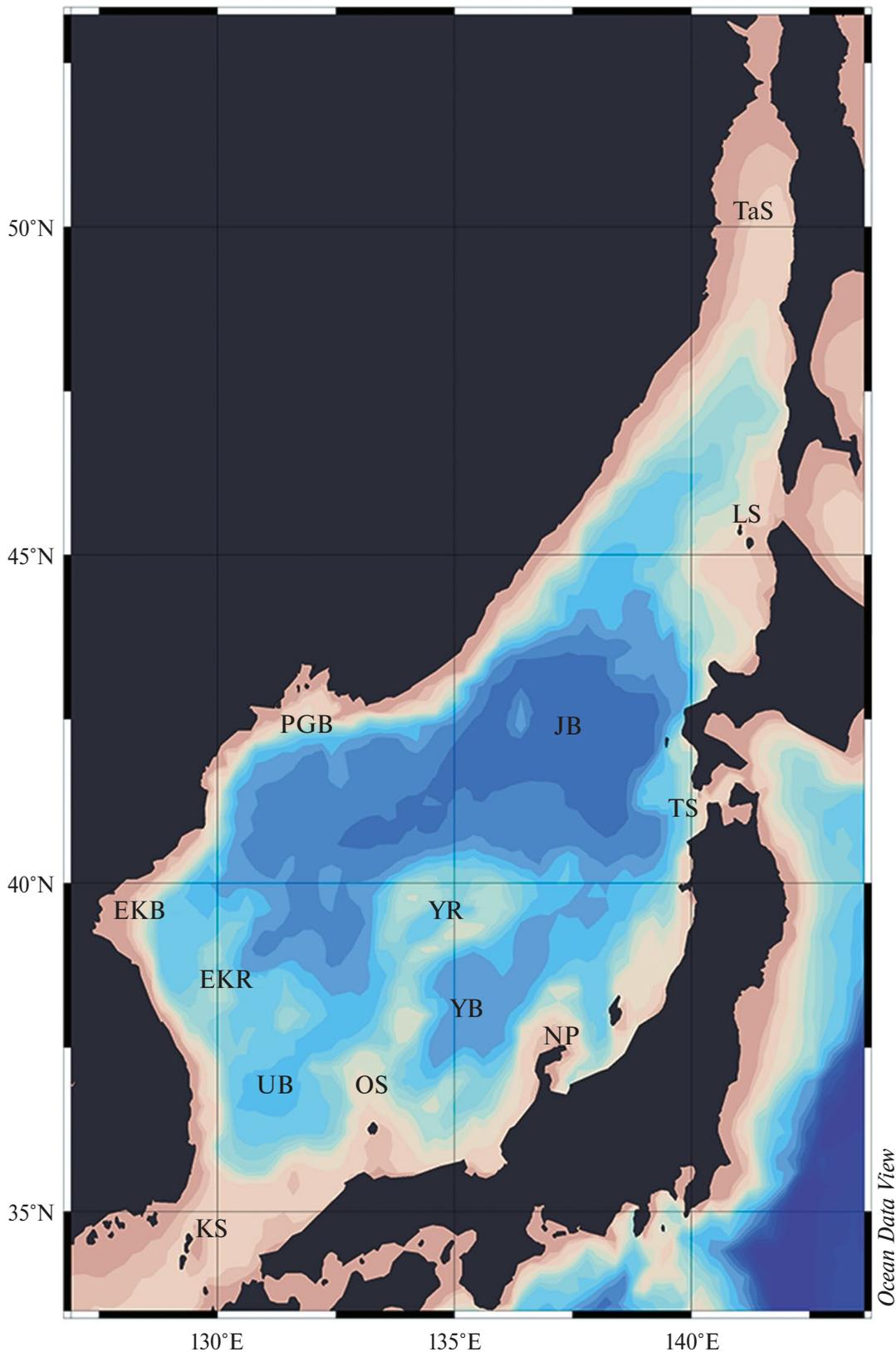


Рис. 1. Рельеф дна Японского моря. Условные обозначения: KS – Корейский (Цусимский) пролив; TS – Сангарский (Цугару) пролив; LS – пролив Лаперуза (Соя); TaS – Татарский пролив; UB – котловина Уллындю; YB – котловина Ямато; JB – Японская котловина; YR – возвышенность Ямато; OS – поднятие Оки; EKR – Восточно-Корейская возвышенность; EKB – Восточно-Корейский залив; PGB – залив Петра Великого; NP – полуостров Ното.

схемы поверхностной циркуляции вод Японского моря, основанные на данных океанографических наблюдений, представлены в работе (Park et al., 2013). В южной и восточной частях моря теплые течения связаны с поступлением субтропических вод из Восточно-Китайского моря через Корейский пролив. В этом районе моря выделяются два основных потока – Восточно-Корейское теплое течение (ВКТТ) и Цусимское теплое течение (ЦТТ). ЦТТ образует две основные ветви – морскую (offshore branch) в центральной части моря и прибрежную (near shore) у побережья о. Хонсю. Приморское (Лиманское) течение наблюдается в северо-западной части моря у побережья Приморья. Термин “Лиманское течение” (Liman Current) был впервые использован Л.И. Шренком (Шренк, 1874) как название холодного течения в Японском море. Это историческое название отражает вклад российского ученого в изучение течений Японского моря и в настоящее время продолжает широко использоваться в международной научной литературе. Северо-Корейское холодное течение, которое можно рассматривать как продолжение Приморского течения, следует в юго-западном направлении вдоль северо-восточного побережья КНДР. В северной части моря в области Японской глубоководной котловины выделяется основной циклонический круговорот. Циклонический круговорот формируется продолжением Цусимского течения, которое следует вдоль побережья о. Хоккайдо по направлению к пр. Лаперуза, Приморским/Северо-Корейским холодным течениями и Субполярным фронтальным течением. Субполярное фронтальное течение связано с Субполярным фронтом, расположенном на 39–41° с.ш. (Park et al., 2004; Talley et al., 2006). Субполярный фронт разделяет теплую субтропическую и холодную субарктическую части Японского моря. На циркуляцию вод существенное влияние оказывает водообмен Японского моря с Восточно-Китайским морем, Тихим океаном и Охотским морем. К основным факторам, определяющим поверхностную циркуляцию в масштабах Японского моря, относятся воздействие ветра и потоки тепла и влаги.

В настоящее время появилась возможность более детально рассмотреть поверхностную циркуляцию вод Японского моря на основе анализа длительных рядов данных, полученных при помощи подповерхностных дрейфующих буев (1988–2023) и спутниковых альтиметрических наблюдений (результаты расчета абсолютных геострофических течений, 1993–2022). Исходя из этого была определена основная цель работы – на основе данных дрейфтерных и спутниковых альтиметрических наблюдений рассмотреть среднюю циркуляцию поверхностных вод Японского моря.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для исследования общей циркуляции вод Японского моря были использованы среднемноголетние данные о течениях, полученные при помощи дрейфтерных и спутниковых альтиметрических наблюдений.

Данные дрейфтерных наблюдений были подготовлены в Атлантической океанографической и метеорологической лаборатории (AOML) Национальной администрации по изучению океана и атмосферы (NOAA) в рамках глобальной дрейфтерной программы GDR (The Global Drifter Program). Массив включает в себя данные, полученные при помощи дрейфтеров лагранжевого типа, оснащенных подвешанным на тросе к поверхностному поплавку подводным парусом-драгой с центром на глубине 15 м. Положение дрейфтеров определялось при помощи спутниковых систем слежения “Argos” и GPS. Используемая конструкция дрейфтеров позволяет получать данные об интегральных течениях в приповерхностном слое. Основным методом обработки данных дрейфтерных наблюдений над течениями рассмотрен в работе (Lumpkin, Johnson, 2013). В последних версиях массива была проведена коррекция движения дрейфтеров без паруса (Laurindo et al., 2017), что позволило увеличить количество данных наблюдений.

Массив данных дрейфтерных наблюдений для Японского моря начал формироваться в 1988 г., в работе использована версия массива 3.10 (август 2023 г.). Исходные поля скоростей течений имеют пространственное разрешение 0.25°, временное – 1 месяц (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/index.php>). В первых исследованиях циркуляции вод Японского моря, выполненных по данным дрейфтерных наблюдений, использовался массив с пространственным разрешением 0.5° (Lee, Niiler, 2005). При этом в отдельных районах моря наблюдения отсутствовали.

Данные об абсолютных геострофических течениях, рассчитанных по спутниковой альтиметрии, были получены из открытого массива данных AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data). Для расчета скорости и направления абсолютных геострофических течений в качестве входного массива используется поле абсолютной динамической топографии поверхности океана ADT (Absolute Dynamic Topography). ADT определяется как сумма средней динамической топографии (MDT – Mean Dynamic Topography) и аномалий уровня моря (SLA – Sea Level Anomaly). При создании этого массива использовались данные всех спутников с альтиметрами, полученные в период с 1993 по 2022 г. Исходные поля абсолютной дина-

мической топографии поверхности океана имеют пространственное разрешение 0.25° , временное — 1 сутки.

СРЕДНЯЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ

Средние течения, построенные по среднемноголетним данным дрейферных (рис. 2) и спутниковых альтиметрических (абсолютные геострофические течения, рис. 3) наблюдений, отражают основные особенности циркуляции вод Японского моря. На рис. 4 схематически показана общая циркуляция вод поверхностного слоя Японского моря. Классификация течений соответствует

международной терминологии. В качестве основы для схематического представления средней циркуляции вод были использованы схемы течений, представленные в работах (Юрасов, Яричин, 1991; Park et al., 2013). В схему течений (рис. 4) внесены некоторые изменения и уточнения в соответствии с результатами, полученными при анализе средних полей поверхностных течений (рис. 2 и 3). Можно отметить, что средние скорости основных течений на карте, построенной по данным дрейферных наблюдений, превышают скорости абсолютных геострофических течений.

Воды ВКТТ поступают в Японское море через западный проход Корейского пролива и далее следуют вдоль юго-восточного побережья Корейско-

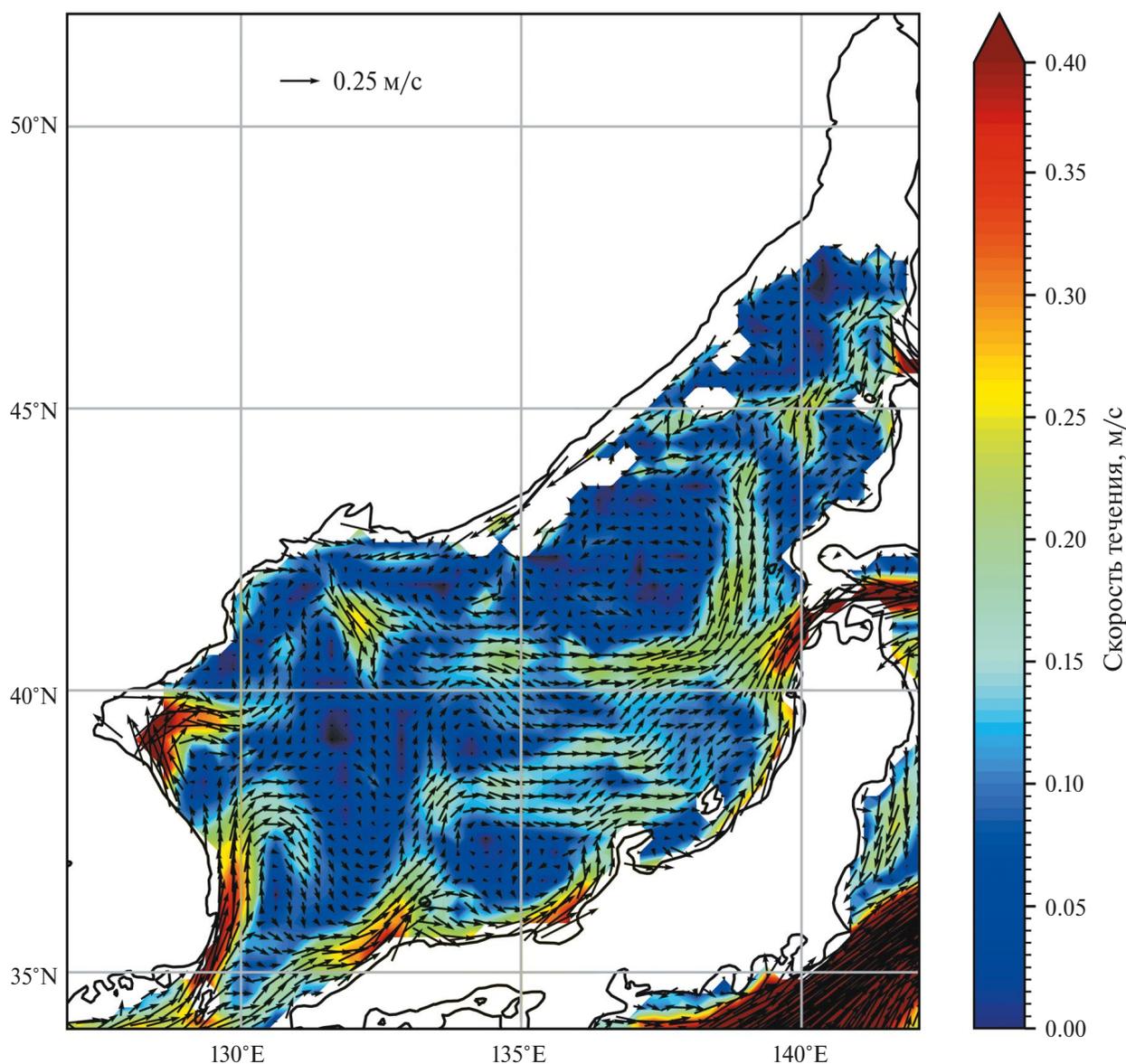


Рис. 2. Средняя циркуляция вод Японского моря по данным дрейферных наблюдений.

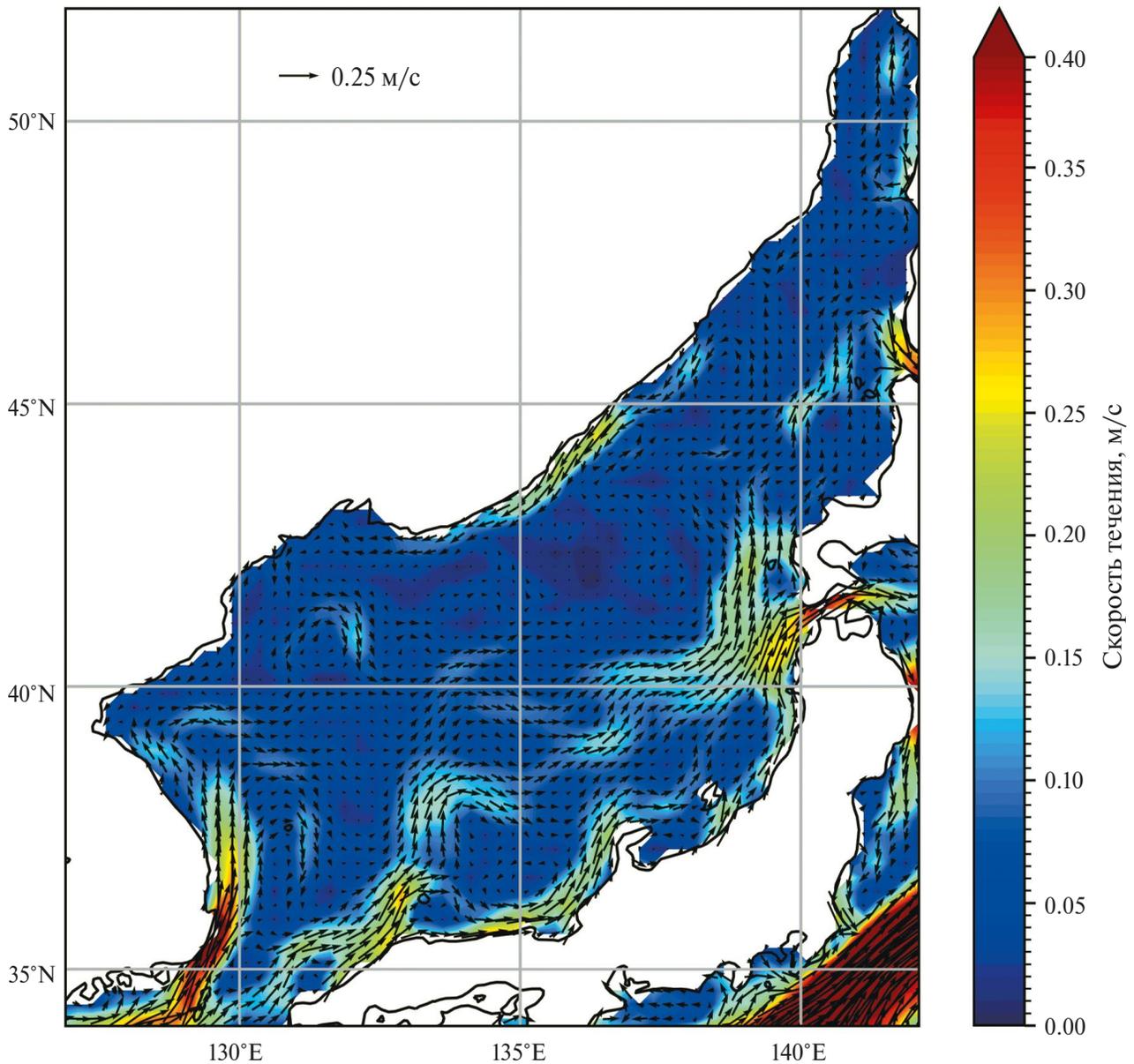


Рис. 3. Средняя циркуляция вод Японского моря по данным спутниковой альтиметрии (абсолютные геострофические течения).

го полуострова. Основная восточная ветвь этого течения отделяется от берега в районе $36-37^\circ$ с.ш. Воды этой ветви участвуют в формировании антициклонического меандра над котловиной Уллындо и в южной мелководной части моря взаимодействуют с водами ЦТТ, которые поступают в Японское море через восточный проход Корейского пролива. Это взаимодействие хорошо выражено на схеме циркуляции вод, построенной по данным дрейферных наблюдений (рис. 2). Воды ВКТТ продолжают движение вдоль побережья Корейского полуострова и затем отделяется от берега в районе Восточно-Корейского залива ($\sim 39-40^\circ$ с.ш.). ВКТТ формирует антициклонический меандр над

Восточно-Корейской возвышенностью и далее следует в восточном направлении вдоль Субполярного фронта. Это фронтальное течение хорошо выражено на карте абсолютных геострофических течений. Воды этой ветви ВКТТ определяют формирование антициклонического меандра в северо-западной части моря с центром, расположенным $\sim 40.5^\circ$ с.ш., 131.5° в.д. Северо-западный меандр ВКТТ огибает цепь подводных гор, расположенных к северо-востоку от Восточно-Корейской возвышенности. В северо-западной части моря воды этого меандра ВКТТ взаимодействуют с Приморским течением, которое отделяется от побережья к западу от зал. Петра Великого (район

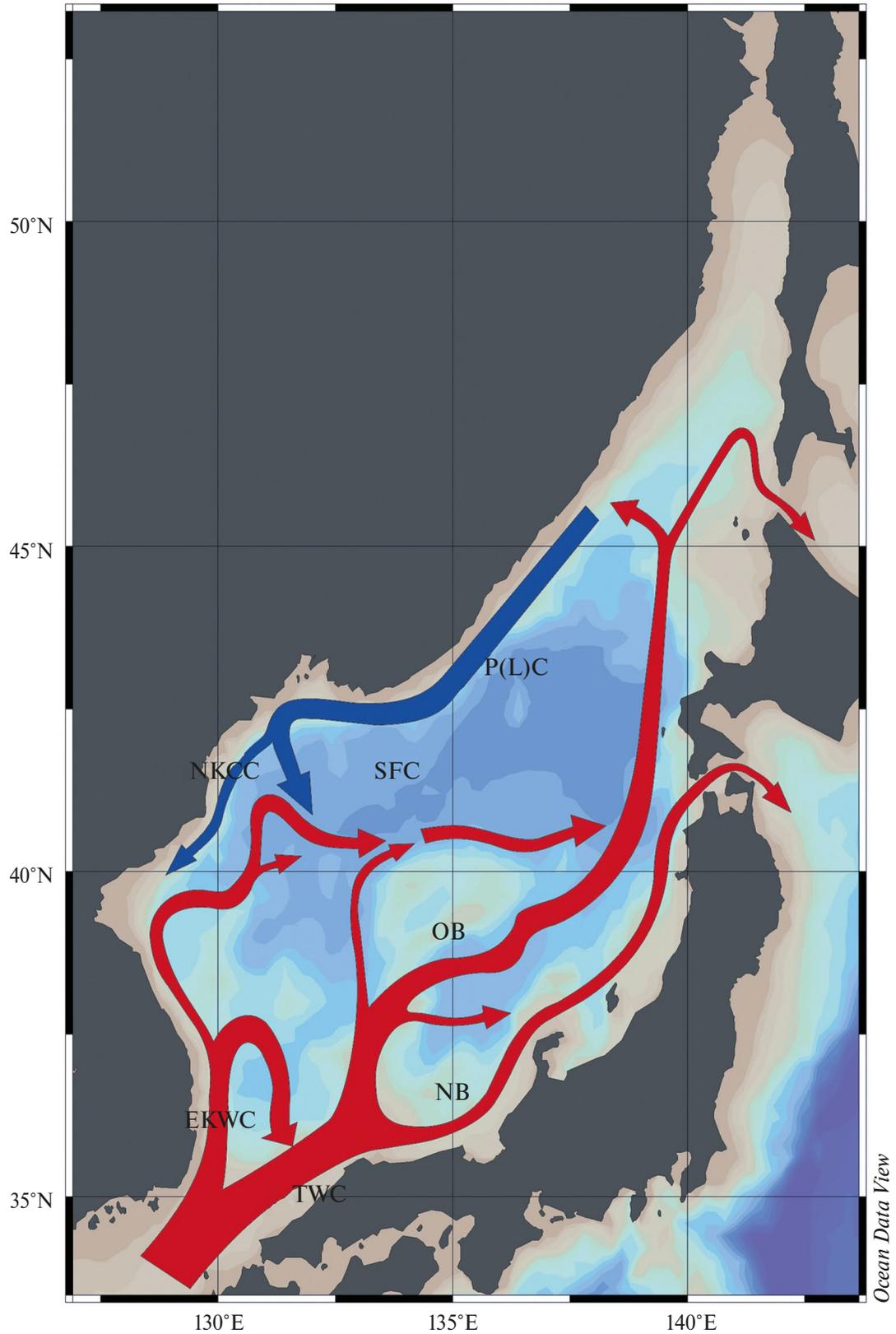


Рис. 4. Карта-схема поверхностных течений Японского моря. Условные обозначения: EKWC – Восточно-Корейское теплое течение; SFC – Субполярное фронтальное течение; TWC – Цусимское теплое течение; NB – прибрежная ветвь TWC; OB – морская ветвь TWC; P(L)C – Приморское течение; NKCC – Северо-Корейское холодное течение.

зал. Посьета). Взаимодействие этих двух течений определяет формирование северо-западного термического фронта (Park et al., 2004). С северо-западным фронтом связано сильное фронтальное течение. Воды этого потока следуют на юго-восток/юг в направлении Субполярного фронта и затем $\sim 40^\circ$ с.ш. поворачивают на восток, где участвуют в формировании Субполярного фронтального течения. Основные особенности циркуляции вод в северо-западной части Японского моря, которые определяются взаимодействием северо-западного меандра ВКТТ и Приморского течения, хорошо выражены на картах средних течений, построенных по двум различным наборам данных наблюдений (рис. 2 и 3).

На картах распределения скоростей средних течений (рис. 2 и 3) выделяются три высокоскоростных участка ВКТТ. Высокие скорости течения наблюдались у юго-восточного побережья Корейского полуострова, при отделении основного потока течения от побережья в районе Восточно-Корейского залива и в зоне северо-западного фронтального течения. По данным дрейферных наблюдений средние скорости течений в поверхностном слое в первых двух районах превышали 0.4 м/с, в области северо-западного меандра – 0.3 м/с.

Цусимское течение определяет циркуляцию вод в восточной части Японского моря. Воды ЦТТ поступают в Японское море через восточный проход Корейского пролива. Наибольшие средние скорости ЦТТ по данным дрейферных наблюдений наблюдались на выходе потока из Корейского пролива (~ 0.4 м/с), в восточной части моря средние скорости не превышают значений 0.2–0.25 м/с. Скорости течения увеличивались за счет взаимодействия с водами ВКТТ в южной мелководной части моря ($35\text{--}36^\circ$ с.ш.). В районе архипелага Оки ЦТТ разделяется на две основные ветви. Прибрежная ветвь ЦТТ следует вдоль побережья о. Хонсю и выходит в Тихий океан через Сангарский пролив. По данным дрейферных наблюдений средние скорости прибрежной ветви ЦТТ в районе зал. Вакаса увеличиваются до 0.25–0.3 м/с. Основная морская ветвь ЦТТ огибает поднятие Оки, где формируется хорошо выраженный антициклонический меандр и затем продолжает движение в северо-восточном направлении над котловиной Ямато по направлению к северо-восточной оконечности о. Хоккайдо. Воды морской ветви ЦТТ взаимодействуют с Субполярным фронтальным течением и определяют формирование западного (40° с.ш., $137\text{--}139^\circ$ в.д.) и северо-восточного участков Субполярного фронта. Северо-восточный Субполярный фронт рассматривается как продолжение основного Субполярного фронта в северной части Японского моря (Talley et al., 2006).

В юго-восточной части Японского моря воды основной морской ветви ЦТТ взаимодействуют с водами прибрежной ветви течения в районе, прилегающем к п-ву Ното (Yabe et al., 2021). Этот поток хорошо выражен на карте, построенной по данным дрейферных наблюдений (рис. 2). В результате этого взаимодействия формируется течение, которое отрывается от побережья о. Хонсю у п-ва Ното и следует вдоль западного склона котловины Ямато по направлению к Сангарскому проливу. Этот поток можно определить как восточную морскую ветвь ЦТТ. Эта ветвь ЦТТ хорошо выражена на карте абсолютных геострофических течений. Прибрежная ветвь ЦТТ слабо прослеживается в районе, расположенном к востоку от п-ва Ното, и вновь усиливается в шельфовой зоне о. Хонсю между о. Садо и Сангарским проливом. На картах-схемах циркуляции вод Японского моря (рис. 2 и 3) не удается четко разделить воды прибрежной и основной/восточной морских ветвей ЦТТ, которые выходят в Тихий океан через Сангарский пролив. Можно отметить, что при подходе к Сангарскому проливу в районе 40° с.ш. наблюдается слияние потоков прибрежной и восточной морской ветвей ЦТТ, что приводит к увеличению скорости течений до 0.3–0.4 м/с. В этом районе значительно уменьшается ширина шельфа и западный склон котловины Ямато, вдоль которого распространяются воды восточной морской ветви ЦТТ, расположен вблизи побережья о. Хонсю.

В районе поднятия Оки от антициклонического меандра морской ветви ЦТТ отделяется поток северного направления, который следует вдоль $\sim 133.5^\circ$ в.д. по направлению к Субполярному фронту. В формировании этой ветви течения участвуют воды восточной ветви ВКТТ, которые взаимодействуют с ЦТ в южной части моря ($\sim 36^\circ$ с.ш.). Это течение далее следует вдоль восточного склона возвышенности Ямато, огибает эту возвышенность с северной стороны и присоединяется к Субполярному фронтальному течению. Этот поток можно определить как западную морскую ветвь ЦТТ.

Субполярное фронтальное течение, связанное с Субполярным фронтом, выделяется в поле поверхностных течений как устойчивый зональный поток, расположенный между 39 и 41° с.ш. В западной части моря формирование фронтального течения определяется водами ветви ВКТТ, которая отделяется от побережья Корейского п-ва в районе 39° с.ш., Северо-западный фронт связан с северо-западным меандром ВКТТ. Динамика вод в северо-западной части моря определяется взаимодействием вод этого меандра с Приморским течением. Таким образом, Приморское течение оказывает влияние на формирование Субполяр-

ного фронтального течения в центральной части моря. Воды западной морской и основной морской ветвей ЦТТ определяют формирование динамического Субполярного фронта в центральной, восточной и северо-восточной частях Японского моря. Условная граница между восточным сектором Субполярного фронта (зона определяющего влияния ВКТТ) и западным участком этого климатического фронта (зона влияния ЦТТ) расположена приблизительно на 133.5° в.д. Эта граница связана с западной морской ветвью ЦТТ, которая следует вдоль восточного склона возвышенности Ямато в северном направлении и прямо взаимодействует с Субполярным фронтальным течением. По данным дрейферных наблюдений наибольшие средние скорости Субарктического фронтального течения наблюдаются в зоне отрыва вод основной ветви ВКТТ от побережья Кореи ($0.25\text{--}0.35$ м/с). Средние скорости Субполярного фронтального течения в зоне влияния ЦТТ достигают значений $0.2\text{--}0.25$ м/с. Формирование продолжения ЦТТ в северо-восточной части моря определяется основной морской ветвью ЦТТ, которая взаимодействует с Субполярным фронтальным течением. При этом невозможно однозначно определить вклад каждого из этих двух потоков в формирование продолжения ЦТТ в северной части Японского моря. Воды этого потока распространяются преимущественно в северном направлении вдоль побережья о. Хоккайдо ($\sim 139^\circ$ в.д.) и выходят в Охотское море через пр. Лаперуза. На первой подробной схеме циркуляции вод Японского моря, построенной по большому массиву данных океанографических наблюдений (Юрасов, Яричин, 1991), это течение определялось как продолжение основного потока Цусимского течения. Средние скорости продолжения ЦТТ по данным дрейферных наблюдений изменяются в диапазоне $0.15\text{--}0.25$ м/с. Среднее положение продолжения Цусимского течения приблизительно совпадает с положением Субполярного фронта в северо-восточной части Японского моря (Talley et al., 2006).

На карте средних абсолютных геострофических течений, построенных по данным спутниковой альтиметрии, Приморское течение хорошо выражено в северо-западной части Японского моря у побережья Восточного и Южного Приморья (рис. 3). На карте, построенной по дрейферным наблюдениям (рис. 2), не представлены данные о Приморском течении у восточного побережья Приморья. Эти данные удалены из открытой версии массива GDP. По спутниковым альтиметрическим данным у Восточного Приморья ($43\text{--}46^\circ$ с.ш.) Приморское течение выделяется как устойчивый поток юго-западного направления со средними скоростями до 0.2 м/с. У берегов Южного Приморья течение поворачивает на запад и следует по

направлению к заливу Петра Великого. Приморское течение отрывается от побережья в районе зал. Посьета (42.5° с.ш., 131.0° в.д.) и затем следует в юго-восточном/южном направлении в сторону Субполярного фронта. Взаимодействие Приморского течения с северо-западным меандром ВКТТ приводит к увеличению скорости течения до 0.3 м/с (данные дрейферных наблюдений). Таким образом, взаимодействие вод Приморского течения и северо-западного меандра ВКТТ определяют формирование северо-западного динамического фронта, который связан с основной субполярной фронтальной зоной Японского моря.

По данным дрейферных наблюдений (рис. 2) не удастся выделить Северо-Корейское холодное течение, которое должно следовать в юго-западном направлении вдоль побережья КНДР. Это связано с сезонной изменчивостью циркуляции вод в северо-западной части Японского моря (Lee and Niiler, 2005). Северо-Корейское холодное течение, которое можно рассматривать как продолжение Приморского течения, выделяется на карте средних абсолютных геострофических течений, построенных по данным спутниковой альтиметрии (рис. 3). Это течение прослеживается от зал. Посьета до Восточно-Корейского залива. На картах, построенных по двум наборам данных (рис. 2 и 3) у побережья КНДР отчетливо выражено прибрежное противотечение которое следует на северо-восток в направлении залива Посьета ($41\text{--}42^\circ$ с.ш.).

На средних схемах течений Японского моря (рис. 2 и 3) в северной части моря выделяется основной циклонический круговорот в области Японской глубоководной котловины. Восточная периферия этого круговорота формируется продолжением ЦТТ в северо-восточной части моря, западная – Приморским течением, южная – Субполярным фронтальным течением. При этом на картах поверхностных течений не удастся отчетливо выделить зону прямого взаимодействия вод продолжения ЦТТ и Приморского течения в районе Татарского пролива. Приморское течение как хорошо выраженный поток со скоростями около $0.15\text{--}0.2$ м/с проявляется на карте абсолютных геострофических течений на широте пр. Лаперуза ($\sim 46^\circ$ с.ш., рис. 3). Этот поток не связан с циркуляцией вод в Татарском проливе. На карте поверхностной циркуляции вод, построенной по данным дрейферных наблюдений (рис. 2) в северной части Японского моря на широте пр. Лаперуза ($45\text{--}46^\circ$ с.ш.), наблюдалась система разнонаправленных течений. Воды продолжения ЦТТ в северо-восточной части моря в основном выходят в Охотское море через пр. Лаперуза. Средняя глубина в пр. Лаперуза $20\text{--}30$ м, максимальная глу-

бина пролива составляет 118 м. Таким образом, в Охотское море поступают только воды поверхностного слоя продолжения Цусимского течения. Высокоскоростное ядро Приморского течения расположено над материковым склоном в слое 0–(300–400) м. Воды промежуточного слоя остаются в Японском море и могут взаимодействовать с Приморским течением. Промежуточные воды повышенной солености, которые формируются в зимний период в области Цусимского течения у побережья о. Хоккайдо (Жабин и др., 2003; Talley et al., 2006), хорошо выражены в зоне влияния Приморского течения.

Сравнительный анализ результатов моделирования средней циркуляции вод Японского моря с данными дрейферных наблюдений был выполнен в работе (Wang et al., 2022). В этом случае в качестве тестового массива была использована одна из версий массива среднесезонных данных дрейферных наблюдений GDP с пространственным разрешением 0.25°. Расчеты средних течений в поверхностном слое проводились по четырем вихре-разрешающим моделям общей циркуляции океана, включая HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model), MRI.COM-WNP (Western North Pacific version of the MRI Community Ocean Model), OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator) и NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean). В работе Wang et al. (2022), где проводился сравнительный анализ результатов моделирования средней циркуляции вод Японского моря с данными дрейферных наблюдений, использовались четыре вихре-разрешающие модели общей циркуляции океана: HYCOM, MRI.COM-WNP, NEMO и OFES.

Из этих четырех моделей ассимиляция данных спутниковых альтиметрических наблюдений используется в следующих моделях: 1) модель HYCOM наиболее активно использует ассимиляцию данных, включая спутниковую альтиметрию; 2) модель MRI.COM-WNP также может включать ассимиляцию спутниковых данных, включая альтиметрию, в зависимости от конфигурации модели и целей исследования; 3) модель NEMO поддерживает ассимиляцию данных, включая спутниковую альтиметрию, для оперативного прогноза и изучения отдельных океанических процессов; 4) модель OFES обычно используется без ассимиляции данных, так как она ориентирована на долгосрочное моделирование климатических процессов и изучения крупномасштабной циркуляции океана без учета оперативных наблюдений.

Таким образом, ассимиляция спутниковых альтиметрических данных используется в моделях HYCOM, MRI.COM-WNP и NEMO.

В работе (Wang et al., 2022) не представлены карты распределения векторов поверхностных течений по результатам численного моделирования циркуляции вод Японского моря. Результаты сравнительного анализа показали, что все модели общей циркуляции недооценивают скорости наблюдаемых поверхностных течений на большей части Японского моря. Наибольшие отличия результатов численного моделирования по сравнению с данными дрейферных наблюдений наблюдались в районе антициклонического меандра ВКТТ в Восточно-Корейском заливе и в зоне Субполярного фронтального течения. Относительно низкие модельные оценки скорости течений были получены для зоны взаимодействия вод северо-западного меандра ВКТТ и южной ветви Приморского течения, которая отделяется от побережья в районе зал. Петра Великого. Модели недооценивают скорость течений у побережья о. Хоккайдо (продолжение ЦТТ) и в зоне взаимодействия вод Цусимского и Приморского течений в северной части Японского моря. С другой стороны, в работе (Laurindo et al., 2017) было выполнено сравнение “тестового” набора данных о поверхностных течениях, полученных при помощи спутниковых альтиметров (AVISO) с выборкой совпадающих по положению и времени данных дрейферных наблюдений. Сравнительный анализ показал, что мезомасштабные меандры и вихри, которые наблюдаются в полях течений, построенных по данным спутниковой альтиметрии, не всегда выделяются на картах, построенных по данным дрейферных наблюдений.

Карта разности течений, рассчитанных по данным альтиметрических и дрейферных наблюдений, показана на рис. 5. В целом по морю соотношение дрейферных и геострофических скоростей течений приблизительно равно 1.6. На рис. 5 видно, что альтиметрические данные показывают более высокие скорости в основном потоке ТЦТ, поступающего в море через Корейский пролив. При этом по данным дрейферных наблюдений наблюдаются более высокие значения скорости Прибрежной ветви течения, которое прослеживается до Сангарского пролива. В области котловины Уллындо по дрейферным наблюдениям заметно превышение скоростей восточной ветви ТВКТ. Максимальное (для моря в целом) увеличение превышения разности скоростей в пользу дрейферов наблюдается в Северо-Корейском заливе в районе отрыва потока, который является продолжением ТВКТ от побережья полуострова Корея в районе 39.8° с.ш. Еще один максимум (более высокие значения скорости по дрейферным наблюдениям) относится к району отрыва Приморского течения от побережья в районе зал. Петра Великого. В целом, к северной части моря преобладают зоны с более высокими значе-

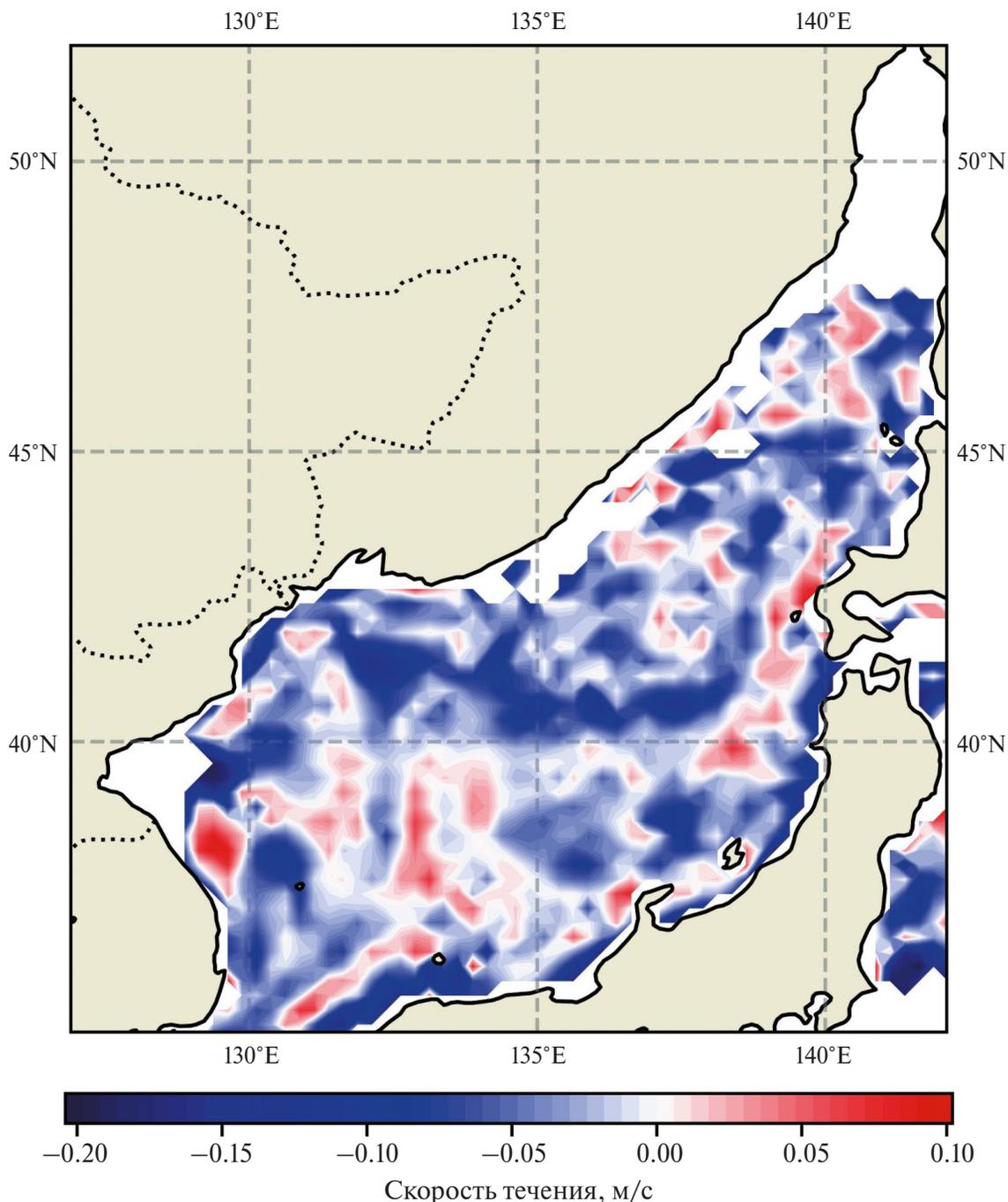


Рис. 5. Распределение разности между скоростями абсолютных геострофических течений по данным спутниковой альтиметрии и скоростями течений по данным дрейферных наблюдений.

ниями скорости дрейферных течений по отношению к геострофическим, при этом они связаны с зонами пограничных течений основного субполярного циклонического круговорота северной части моря: продолжения Цусимского течения, Приморского и Субполярного фронтального течения. В юго-восточной части моря в основном преобладает превышение скоростей геострофических течений во всех районах, кроме Прибрежной

ветви Цусимского течения и северной части бассейна Ямато, где наблюдается высокая вихревая активность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем, карты средней циркуляции вод, полученные по данным дрейферных и спутниковых

альтиметрических наблюдений, соответствуют существующим представлениям о течениях и динамике вод Японского моря. Циркуляция вод в южной и северо-восточной частях Японского моря определяется водообменом через Корейский пролив, который приводит к формированию двух основных теплых течений Японского моря – ВКТТ и ЦТТ. Взаимодействие этих течений с рельефом дна (котловины Уллындо и Ямато, Восточно-Корейская возвышенность, возвышенности Оки и Ямато) определяет разделение этих потоков на отдельные ветви и формирование квазистационарных меандров.

Сравнение двух схем средней циркуляции вод (рис. 2 и 3) показало, что различия в основном связаны с циклоническим круговоротом в северной части Японского моря. Это отчетливо проявляется в северо-западной части моря. В одном случае (дрифтерные наблюдения, рис. 2) Северо-Корейское холодное течение на западной периферии этого круговорота отсутствует. Во втором случае (абсолютные геострофические течения, рис. 3) у побережья КНДР наблюдается Северо-Корейское холодное течение. Карты средних течений показывают, что западная периферия циклонического круговорота в северной части Японского моря формируется Приморским течением, которое отрывается от побережья в районе зал. Петра Великого и далее следует на юго-восток в направлении Субполярного фронта. Динамическая структура вод в северо-западной части Японского моря определяется северо-западным антициклоническим меандром ВКТТ и Приморским течением. В зоне контакта этих двух потоков формируется северо-западный динамический фронт. Можно отметить, что карты средних течений (рис. 2 и 3) не позволяют провести детальный анализ динамики вод на северной периферии циклонического круговорота (45–46° с.ш.), где должно происходить прямое взаимодействие между водами, связанными с продолжением ЦТТ у побережья о. Хоккайдо и Приморским течением. По данным дрифтерных наблюдений (рис. 2) в этом районе наблюдаются разнонаправленные течения. Результаты расчета абсолютных геострофических течений показали, что взаимодействие этих двух течений слабо выражено в поверхностном слое (рис. 3). Поверхностные воды продолжения ЦТТ в основном выходят в Охотское море через пр. Лаперуза. Формирование Субполярного фронтального течения, связанного с климатическим Субполярным фронтом (39–41° с.ш.) в западной части моря, определяется водами основной ветви ВКТТ. Приморское течение влияет на северную динамическую границу этой фронтальной зоны. В центральной и восточной частях Японского моря Субполярный фронт связан с ЦТТ. Эти вопросы продолжают

вызывать определенный интерес и в дальнейшем могут быть рассмотрены более подробно с привлечением данных прямых океанографических наблюдений. Геострофические расчеты, выполненные по данным спутниковой альтиметрии, полезны для понимания крупномасштабной динамики вод, но недостаточны для описания прибрежных и мезомасштабных процессов. Реальные скорости поверхностных течений, измеренные дрифтерами, часто значительно выше в зоне основных течений и фронтальных зонах Японского моря.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках гос. задания ТОИ ДВО РАН по теме № 6, рег. № 124022100079-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жабин И.А., Таранова С.Н., Талли Л.Д. Промежуточные воды повышенной солености в северной части Японского моря // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 63–72.
- 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.
- Шренк Л. О течениях в Охотского, Японского и смежных с ними морей. По термометрическим наблюдениям, произведенным на русских военных судах. СПб., 1874. 112 с. Приложение к 23-му тому Записок Императорской академии наук, № 3.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 1991. 176 с
- Chang K.I., Zhang C.I., Park C., Kang D.J., Ju S.J., Lee S.H., Wimbush M. Oceanography of the East Sea (Japan Sea). Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2016. P. 87–126.
- Laurindo L., Mariano A., Lumpkin R. An improved near-surface velocity climatology for the global ocean from drifter observations // Deep-Sea Res. 2017. V. 124. P. 73–92.
- Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep Sea Res. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1547–1563.
- Lumpkin R., Johnson G.C. Global ocean surface velocities from drifters: mean, variance, ENSO response, and seasonal cycle // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 2992–3006.
- Nikitin A.A., Tsypysheva I.L., Zuenko Y.I. Spatial patterns of the Primorye Current in the northwestern East/Japan Sea on satellite images and standard sections // Ocean Sci. J. 2023. V. 58. 22. <https://doi.org/10.1007/s12601-023-00116-z>
- 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. DOI: 10.1029/2004GL01942.
- Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., Byun D.-S., Lee E.-I. An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements // J. Korean Soc. Oceanogr. 2013. V. 18. P. 234–265.

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.

Wang H., Ren K., Lina M., Yu C., Chen W., Zhang W. Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple

eddy-resolving ocean circulation models. *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9:1050028. DOI: 10.3389/fmars.2022.1050028.

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>, 2021.

Mean Circulation of the Japan Sea from Drifter Data and Satellite Altimetry Observations

I. A. Zhabin¹, S. N. Taranova¹, N. B. Luk'yanova¹

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

Knowledge of long-term mean by highly variable currents is essential to understanding the regional climate change in the Japan Sea. Strength and location of the major currents can be identified from the subsurface drifter observation (Global Drifter Program, 1988-2023) and surface absolute geostrophic current field (AVISO satellite altimetry, 1993-2022). The well-known circulation patterns are observed, as the Tsushima Warm Current (TWC), the East-Korean Warm Current (EKWC), the Primorye (Liman) Current, Subpolar Front Current, and the northern cyclonic gyre. A detailed analysis of the surface current field showed that the EKWC in the western part of the Sea of Japan forms three anticyclonic meanders. The well pronounced eastern meander (branch) of this current is observed in the Ulleung Basin. The second meander is formed due to flow separation from the coast in the area of East Korea Bay. The third meander is observed in the northwestern part of the Sea of Japan. The Primorye Current breaks away from the coast of Primorye in the area of Peter the Great Bay and follows to the Subpolar front.. The interaction of the Primorye Current with the northwestern meander of the EKWC leads to the formation of the northwestern dynamic front. Our analyses revealed that the TWC is divided into the nearshore (coastal) branch and three branches of offshore TWC. Formation of the Subpolar Front Current in the western part of the sea is determined by the waters of the ECWT. The Primorye Current affects the northern dynamic boundary of this frontal zone. In the central and eastern parts of the Sea of Japan, the subpolar front is connected with the TWC. The northern cyclonic gyre is formed by the continuation of the TWC along the coast of Hokkaido Island, the Primorye Current and the Subpolar Front Current. The mean locations of major surface currents were explicated relative to topographic features with schematic representation of surface circulation.

Keywords: Sea of Japan, mean circulation, currents, subsurface drifting buoys, satellite altimetry, absolute geostrophic currents

REFERENCES

Chang K.I., Zhang C.I., Park C., Kang D.J., Ju S.J., Lee S.H., Wimbush M. *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*. Springer:Berlin/Heidelberg, Germany. 2016. P. 87–126.

Laurindo L., Mariano A., Lumpkin R. An improved near-surface velocity climatology for the global ocean from drifter observations // *Deep-Sea Res.* 2017. V. 124. P. 73–92.

Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // *Deep Sea Res.* 2005. V. 52. № 11–13. P. 1547–1563.

Lumpkin R., Johnson G.C. Global ocean surface velocities from drifters: mean, variance, ENSO response, and seasonal cycle // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2992–3006.

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. DOI: 10.1029/2004GL01942.

Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., Byun D.-S., Lee E.-I. An oceanic current map of the East Sea for science textbooks

based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements // *J. Korean Soc. Oceanogr.* 2013. V. 18. P. 234–265.

Nikitin A.A., Tsypysheva I.L., Zuenko Y.I. Spatial patterns of the Primorye Current in the northwestern East/Japan Sea on satellite images and standard sections // *Ocean Sci. J.* 2023. V. 58. 22. <https://doi.org/10.1007/s12601-023-00116-z>

Shrenk L.I. On the currents of the Okhotsk, Japan and adjacent seas. *Memoires of Emperor Academy of Sciences.* 1874. 23(2) Suppl. 3. P. 1–112.

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.

Wang H., Ren K., Lina M., Yu C., Chen W., Zhang W. Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models. *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9:1050028. DOI: 10.3389/fmars.2022.1050028.

Yabe I., Kawaguch Y., Wagawa T., Fujio S. Anatomical study of Tsushima Warm Current: Determination of principal path-

ways 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. Tечeniya Yaponskogo moraya [Currents of the Sea of Japan]. Vladivostok: DVO AN USSR. 1991. 176 p. (In Russian).

Zhabin I.A., Taranova S.N., Talley L.D. Provezhutochnye vody povyshennoy solenosti v severnoy chasti Yaponskogo moraya [High salinity intermediate water of in the northern part of the Japan Sea] // Russian Meteorology and Hydrology. 2003. № 4. P. 63–72. (In Russian).