

Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:
«Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле»



**Пример сопоставления вихревых структур в полях
эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-
западной части Тихого океана**

Новоселова Елена Владимировна, Травкин Владимир

*Станиславович, Лебедева Мария Алексеевна, Удалов Александр Алексеевич, Будянский
Максим Васильевич, Белоненко Татьяна Васильевна*

DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.209>

Дата получения рукописи: 31.07.2023

Дата принятия рукописи в печать: 15.02.2024

Для цитирования: Новоселова, Е. В., Травкин, В. С., Лебедева, М. А., Удалов, А. А., Будянский, М. В., Белоненко, Т. В. (2024). Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2).

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.209>

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

УДК 551.465

Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана*

*Е. В. Новоселова¹, В. С. Травкин^{1,2}, М. А. Лебедева¹, А. А. Удалов³,
М. В. Будянский³, Т. В. Белоненко¹*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова,

Российская Федерация, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева,

Российская Федерация, Владивосток, 690041, ул. Балтийская, 43

Для цитирования: Новоселова, Е. В., Травкин, В. С., Лебедева, М. А., Удалов, А. А., Будянский, М. В., Белоненко, Т. В. (2024). Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2).

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.209>

В данной работе проводится совместный анализ пространственных распределений океанологических полей на основе эйлерова и лагранжева подходов. Если в эйлеровом подходе движение среды рассматривается как функция координат и времени, а уравнения движения записываются для определенных точек в пространстве, то лагранжев подход фокусируется на отслеживании индивидуальных частиц в океане. В этом подходе частицы, представляющие водные массы или другие материалы, рассматриваются как отдельные объекты, перемещающиеся в соответствии с уравнениями движения. Рассматривается изменчивость океанологических характеристик для района

* Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № 116442164.

Северо-западной части Тихого океана. Анализируются пространственные распределения океанологических полей, построенные за 24 октября 2010 г. Для идентификации мезомасштабных вихрей используется алгоритм AMEDA. В рамках эйлерова подхода показано, что домены с запретом к вытягиванию мезомасштабных вихрей только частично соответствуют областям расположения крупномасштабных вихрей. Вихревые структуры и элементы крупномасштабной циркуляции хорошо проявляются на распределениях показателя Ляпунова (Λ -карты) и картах, характеризующих траектории адвектируемых частиц (S -карты). Повышенные значения кинетической и доступной потенциальной энергии соответствуют основным структурам циркуляции в регионе, однако для анализа эволюции циркуляционных структур они мало информативны по сравнению с Λ -картами и S -картами, аккумулирующими информацию о предыдущем периоде. Построены пространственные распределения относительной завихренности и потенциальной завихренности Эртеля. Показано, что положительные величины относительной завихренности окаймляют Продолжение Куроисио с севера, а отрицательные — с юга, что характерно для струйных течений, направленных на восток. Лагранжев эксперимент с пятнами пассивных маркеров показал, что пятно, которое большую часть анализируемого промежутка времени находилось в домене, где вытягивание вихрей запрещено, наиболее устойчиво к деформации.

Ключевые слова: эйлеров подход, лагранжев подход, Северо-западная часть Тихого океана, GLORYS12V, мезомасштабные вихри, Куроисио, Ойяиси, пассивные маркеры

1. Введение

Эйлеров и лагранжев подходы — это два различных математических метода изучения движения океанических потоков. В то время как в эйлеровом подходе движение среды рассматривается как функция координат и времени, лагранжев подход фокусируется на отслеживании индивидуальных частиц в океане. Эйлерово описание широко используется в классической гидродинамике, где уравнения движения записываются для определенных точек в пространстве. Эйлеров подход основан на принципе сохранения массы и импульса в океане, а потоки жидкости рассматриваются как непрерывное поле, в котором вода перемещается от одной точки к другой с течением времени. Лагранжевы модели позволяют исследовать траектории и перемещение

отдельных частиц, что особенно полезно для изучения транспорта и перемешивания в океане, а также распространения загрязнений или организмов.

Несмотря на то, что эйлеров и лагранжев подходы различны, при моделировании океанографических полей они взаимосвязаны и дополняют друг друга.

Целью данного исследования является совместный анализ пространственного распределения океанологических полей на основе эйлерова и лагранжева подходов. Сравнительный анализ позволит наилучшим образом определить достоинства и возможности каждого метода.

2. Методы исследования и используемые данные

В нашей работе мы будем использовать данные глобального вихререзающего реанализа GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis). Эти данные доступны на портале CMEMS¹ (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Они имеют пространственное разрешение $1/12^\circ$ и даны на 50 уровнях за период проведения альтиметрических наблюдений (с 1993 г.). GLORYS12V1 основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. Модель NEMO с форсингом ECMWF ERA-Interim используется для реанализа циркуляции океана. Наблюдения усваиваются с помощью фильтра Калмана низкого порядка. Данные *in situ* спутниковых альтиметров (аномалия уровня моря), температура поверхности моря, сплоченность морского льда и вертикальные профили температуры и солёности усваиваются совместно.

Вихри и вихревые структуры в эйлеровом подходе представляются как двумерные или трехмерные поля скорости. В рамках эйлерового подхода В. В. Жмур, (Жмур, 2011) характеризуя вихрь, говорит, что это вращающееся, практически как твердое тело, вихревое ядро с захваченной вокруг ядра массой морской воды, вращающейся в ту же сторону, что и жидкие частицы ядра, но с уменьшающимися орбитальными скоростями по мере удаления от границы вихревого ядра. В ядре вихря находится морская вода, захваченная при генерации вихря и имеющая завихренность, намного превышающую фоновую завихренность. В.В. Жмур сравнивает ядро вихря с «водяным мешком», который движется вместе с образующей его водой, вследствие чего вихрь переносит воду от места его зарождения на огромные расстояния. Форма ядра (его

¹ Доступно на: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description. (Дата доступа 01.06.2024).

граница), как правило, вращается, при этом само ядро может деформироваться (Жмур, 2011). В рамках эйлерового подхода В. В. Жмур определяет условия, при которых мезомасштабные вихри могут вытягиваться в вихревые нити, называемые филаментами (Жмур и др., 2023а, б, в). Эти условия определяются взаимодействием вихря с течением, при этом вихрь является бароклинным, а внешнее сдвиговое течение баротропным. Для выявления областей, где вихри потенциально могут вытягиваться в филаменты или, наоборот, где такое вытягивание запрещено, необходимо построить и проанализировать пространственное распределение динамической характеристики поля течений $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$, где

$$\gamma = \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2), \quad \gamma_1 = -\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y}; \quad \gamma_2 = \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x}, \quad e = \frac{1}{2} \sqrt{(2\tilde{e})^2 + (\gamma_1 - \gamma_2)^2},$$

$$\tilde{e} = \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} = -\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y}. \text{ Знак } \langle \dots \rangle \text{ означает временное осреднение за месяц.}$$

Согласно исследованиям В. В. Жмура, с соавторами (Жмур и др., 2023а, б), в районах, для которых выполняется условие $\left| \frac{\gamma}{e} \right| \leq 1$, вытягивание вихрей в вихревые нити (филаменты) возможно. В областях, где $\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$, вытягивание вихрей запрещено. В работах (Жмур и др., 2023а, в) представлены примеры распределений $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ для различных акваторий Мирового океана. Эти распределения рассчитываются и строятся в рамках эйлерового подхода.

В лагранжевом подходе поля скорости, рассматриваемые на сеточной области в виде дискретных наборов данных, используются для отслеживания частиц. Для этого решаются уравнения адвекции для большого числа пассивных трассеров на земной сфере в заданном поле скорости вида

$$\frac{d\lambda}{dt} = U(\lambda, \varphi, t), \quad \frac{d\varphi}{dt} = V(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где U, V — угловые зональная и меридиональная скорости; φ, λ — широта и долгота соответственно.

В лагранжевом подходе вихревые структуры рассматриваются как перемещающиеся массы воды или других веществ, которые формируются и эволюционируют в процессе движения в океане. Центры вихрей определяются как эллиптические точки (устойчивые стационарные точки двумерного поля скорости), а

области неустойчивости на границе вихрей ассоциируются с гиперболическими точками (неустойчивыми стационарными точками двумерного поля скорости) (Prants et al., 2015; Prants et al., 2017; Prants et al., 2023). В рамках лагранжева подхода каждому элементарному объему воды можно сопоставить физико-химические свойства (температуру, соленость, плотность, радиоактивность и т. д.), которые характеризуют этот объем при его движении. Кроме того, каждой частице воды можно поставить в соответствие функции траектории, которые несут ключевую информацию динамического характера. Такой подход позволяет детально визуализировать процесс вихревого водообмена, а также этапы формирования, деления, слияния и гибели вихрей.

Для обнаружения мезомасштабных вихрей в исследуемом регионе мы применяем алгоритм AMEDA (Angular Momentum Eddy Detection Algorithm), который основан на принципе определения замкнутых линий тока из поля высоты морской поверхности (SSH, sea surface height) или относительной завихренности (Le Vu et al., 2018).

3. Распределения эйлеровых и лагранжевых характеристик гидрологических полей для района Северо-западной части Тихого океана

В настоящей работе проводится совместный анализ характеристик гидрологических полей в эйлеровых и лагранжевых координатах, который позволяет более глубоко понять связь между движением жидкости и ее характеристиками. На рис. 1 показано распределение величин $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$, которое характеризует потенциальную возможность вихрей вытягиваться в филаменты. Видно, что крупные пятна коричневого цвета (домены), соответствующие значениям $\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$, где вытягивание вихрей запрещено, как правило, ограничены контурами мезомасштабных вихрей, построенными при помощи алгоритма AMEDA. Отметим, что на рис. 1 не все домены с запретом вытягивания вихрей окружены соответствующим контуром границы вихря. Более того, не все эти домены соответствуют мезомасштабным вихрям — на рис. 1 расположение центров циклонов и антициклонов показано треугольниками. Это означает, что области, где вытягивание вихрей запрещено, хотя и пересекаются, но полностью не совпадают с областями мезомасштабных вихрей. Эти домены, показанные на рисунке коричневым цветом, характеризуют лишь потенциальный запрет к вытягиванию вихрей, если бы таковые в данный момент находились в этих доменах.

Возможно, отмеченные несоответствия между теорией и расчетами $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$, представленными на рис. 1, обусловлены тем, что теория разработана для случая баротропного течения, в то время как в реальности течения бароклинны. Тем не менее следует отметить, что в целом распределение $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ неплохо соответствует данной теории.

Следует отметить, что в распределениях величин $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ не выделяются крупномасштабные элементы циркуляции, например течение Куроисио. Эти домены, где вытягивание вихрей запрещено, расположены более или менее равномерно по всему району. Зато стрежни течений и вихревые структуры хорошо видны на распределении накопленного за прошлые 15 суток показателя Ляпунова (рис. 2). Показатель Ляпунова количественно определяет среднюю скорость разбегания соседних траекторий в фазовом пространстве, т. е. указывает: является ли система в рассматриваемой области пространства устойчивой, хаотической или находится в состоянии между этими режимами. Черные полосы на рис. 2, называются риджами (ridges) (Prants et al., 2015), это области потока с максимальным значением показателя Ляпунова, который определяет скорость экспоненциального расхождения (схождения) изначально близких траекторий в динамической системе и дает информацию о ее долгосрочном поведении и предсказуемости. Распределение показателя Ляпунова на карте позволяет выявить области устойчивости или неустойчивости системы, указывает на структуры в виде вихрей и вытянутых линий (риджей), тянущихся от гиперболических точек. На рис. 2 в районе от 35° до 39° с.ш. в виде нескольких полос черного цвета выделяется струя Куроисио с меандрами и оторвавшимися от струи крупными рингами. Широкие черными риджами выделяются прибрежные районы Хоккайдо и район течения Ойяисио (это связано с зацеплением соседних траекторий за береговую линию (Prants et al., 2023)), омывающего с океанской стороны Курильские острова. Линии черного цвета на рисунке маркируют линии тока (стрежни) течения Куроисио и прибрежные течения. Сгущения риджей на карте показателя Ляпунова выделяют в регионе мезомасштабные вихри и иные вихревые структуры. Изображение на рис. 2 доказывает, что рассматриваемый регион является исключительно динамически активным. Действительно, это район активного взаимодействия теплых вод Куроисио и холодных Ойяисио, а из-за неустойчивости этих течений образуется множество вихрей, взаимодействующих как с течениями, так и друг с другом.

Вихревые структуры и стрежни течений отчетливо выделяются также на S-карте (рис. 3). Интенсивный черный цвет означает, например, что за предыдущие 15 суток частица прошла 500 км, а если цвет серый, то 50 или 100 км. Частицы воды в вихрях вращаются вокруг их центров, накручивая десятки километров, поэтому вихри выделяются насыщенным черным цветом. Стрежень Куроисио, где мгновенная скорость может достигать 1.7 м/с (Белоненко и др., 2009), выделяется извивающейся черной полосой. На рис. 3 также видно, что в северной части региона меньшие скорости частиц соответствуют меньшей интенсивности цветовой шкалы, за исключением вихревых структур, выделенных темным цветом. Действительно, максимальные скорости здесь достигают 0.5 м/с. Отметим, что здесь также крупные вихри выделены цветными контурами, построенными по алгоритму AMEDA (синие соответствуют циклонам, красные — антициклонам).

4. Сравнение контуров алгоритма AMEDA с расположением эллиптических точек лагранжева подхода

Следует признать, что на рис. 3 далеко не все эллиптические точки, маркирующие центры вихрей, окружены контурами алгоритма AMEDA. Это обусловлено тем, что алгоритм AMEDA создавался с учетом определенных критериев, многие из которых опираются на эмпирические пороговые значения градиентов аномалий уровня моря. На рис. 4 видно, что пороговые значения алгоритма AMEDA не всегда позволяют выделить вихри и построить соответствующие контуры, в то время как Лагранжев подход, опирающийся на динамические критерии (Prants et al., 2015; Prants et al., 2017; Prants et al., 2023), определяет эллиптические точки по полю скоростей течений, тем самым он является более точным методом нахождения центров вихрей. На рис. 4 показано, что максимальные значения аномалий уровня моря наблюдаются в стрежне Куроисио (до 1.3 м), в то время как в течении Ойяисио и северо-восточной части акватории аномалии отрицательные (-0.3 м).

5. Кинетическая и доступная потенциальная энергия

На рис. 5 показаны кинетическая и доступная потенциальная энергия, рассчитанные по формулам соответственно:

$$H_{kin} = \frac{1}{2} \iiint \left[\rho_{\Sigma}(x, y, z) (u^2(x, y, z) + v^2(x, y, z)) \right] dx dy dz, \quad (2)$$

$$H_{pot} = \frac{1}{2} \iiint \left[\frac{g^2}{\rho_0(z)} \frac{\rho^2(x, y, z)}{N^2(x, y, z)} \right] dx dy dz, \quad (3)$$

где ρ_0 — средняя плотность морской воды по глубине моря; u, v — зональная и меридиональная компоненты скорости потока; g — ускорение свободного падения; N — частота Вайсяля-Брента; $\rho = \rho_{\Sigma} - \rho_0$ — отклонение текущей плотности ρ_{Σ} от ρ_0 . Доступная потенциальная энергия рассчитывалась в слое от поверхности до 1000 м в каждой ячейке сеточной области.

Повышенные значения кинетической энергии на рис. 5, а соответствуют основным структурам циркуляции в регионе. Как и следовало ожидать, максимальные значения кинетической энергии характерны для струи Куроисио и ее антициклонических рингов, а также для крупного антициклона, расположенного на мористой стороне Курильского желоба (Пранц, 2021; Травкин и др., 2022). Максимальные значения доступной потенциальной энергии (рис. 5, б) наблюдаются в широкой зоне Куроисио и на севере региона, а также в Японском море. Известно, что в океане индикатором доступной потенциальной энергии служит отклонение плотности от ее среднего (по массе океана) значения, что, собственно, следует из формулы (3). Понятие о доступной потенциальной энергии в применении к атмосфере было введено Э. Лоренцом (Lorenz, 1955), как та часть лабильной (т. е. суммы внутренней и потенциальной) энергии атмосферы в целом, которая может быть превращена в кинетическую энергию посредством адиабатических процессов, т. е. когда сумма лабильной и кинетической энергий не меняется (Вулис и Монин, 1975). Позднее это понятие стало применяться и для океана, где существуют потоки плавучести, приводящие в движение термохалинную циркуляцию (Вулис и Монин, 1975). Повышенные значения доступной потенциальной энергии характерны не только для течений, но также и для крупномасштабных вихрей. Это, в первую очередь, относится к антициклонам, где отклонение изопикн от их среднего положения связано с движением частиц в вихре, которое раздвигает по вертикали изопикны. И, наоборот, в циклонах происходит аналогичное сближение изопикн, приводящее к изменению стратификации (Жмур, 2011; Zhmur et al., 2021; Жмур и др., 2022).

6. Относительная и потенциальная завихренности

На рис. 6, а показана относительная завихренность: $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, а на рис. 6, б —

потенциальная завихренность PV . Здесь u, v — горизонтальные составляющие вектора скорости, система координат выбрана так, что ось x направлена на восток, ось y — на север. Потенциальная завихренность рассчитывалась по формуле Эртеля:

$$PV = \frac{(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho} = -\frac{(f + \zeta)N^2}{g}, \quad (4)$$

где N — частота Вайсяля — Брента; f — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения; ρ — плотность воды на горизонте.

Обратим внимание, что в распределении относительной завихренности (рис. 6, а) струя Куроисио проявляется в виде полосы наибольших значений разного знака, причем положительные величины завихренности окаймляют течение с севера, а отрицательные — с юга, что характерно для струйных течений с выраженной зональной составляющей. Подобную структуру можно обнаружить и для ветви Северо-Тихоокеанского течения в районе 42° с.ш., 150° – 160° в.д. Отметим значительное меандрирование течений, которое хорошо проявляется как в распределении относительной завихренности, так и в распределениях других характеристик (см. рис. 2–5). Максимальные величины относительной завихренности также характерны для вихрей: отрицательные для антициклонов и положительные для циклонов. Заметим, что все крупные антициклоны, которые на рис. 6, а показаны замкнутыми областями зеленого цвета (отрицательные значения), по периметру окружены кольцами с положительной завихренностью (показаны коричневым цветом). Этот эффект, когда вихри окружены кольцом с противоположной завихренностью, называется экранированием (shielded vortices) (Carton, 2001).

Аналогичный эффект экранирования наблюдается и на рис. 6, б, на котором представлено распределение потенциальной завихренности и воспроизводятся основные специфические черты, которые характерны также и для относительной завихренности. В распределении потенциальной завихренности струя Куроисио проявляется в виде полосы практически нулевых значений в поверхностном 70-метровом слое (не показано). Далее картина меняется на противоположную, и на горизонтах до 350 м Куроисио ярко выделяется максимальными значениями завихренности (до $4 \cdot 10^{-9}$) на фоне окружающих вод (рис. 6, б). На глубине более 700 м для всего исследуемого района

характерны малые значения потенциальной завихренности порядка 10^{-11} – 10^{-10} (не показано).

7. Лагранжев эксперимент с маркерами

В рамках лагранжева подхода мы проверили следующий эксперимент. Четыре разноцветных пятна пассивных маркеров, представленных на картах в виде прямоугольников, были размещены на поверхности воды в доменах с различными значениями величин $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$. На рис. 7, а показано исходное расположение этих пятен.

Фиолетовое пятно расположено в области $\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$, где вытягивание вихрей запрещено.

Для остальных пятен характеристики поля скоростей соответствуют $\left| \frac{\gamma}{e} \right| < 1$, где существует потенциальная возможность вытягивания вихрей. Далее мы следили за судьбой этих маркеров.

С течением времени пятна, которые изначально имели квадратную форму, эволюционировали и постепенно деформировались (рис. 7, б). Сразу отметим, что менее всего деформировалось зеленое пятно, которое почти сразу оказалось в домене $\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$, где вытягивание запрещено, в то время как фиолетовое пятно, наоборот, переместилось в домен с противоположными свойствами. Желтое, синее и фиолетовое пятна постепенно превратились в тонкие прерывистые линии, вытянутые вдоль линий лагранжевых фронтов, а зеленое пятно, хотя тоже деформировалось, стало похожим на вытянутую запятую. Этот эксперимент показывает, что пятна маркеров трансформируются самым неожиданным образом, как правило, вытягиваясь в ленту, при этом аналогично трансформируется и то пятно, которое изначально находилось в области, где вытягивание запрещено (синее пятно). Мы ожидали, что это пятно сохранит свою форму или, по крайней мере, останется в области, ограниченной контуром вихря. Однако этого не произошло. Это означает, что в рассматриваемый промежуток времени происходил активный водообмен вихря с окружающей средой. Это также означает, что частицы воды, составляющие ядро вихря, могут покидать контур вихря и замещаться другими частицами, при этом вихрь по-прежнему может сохранять свою динамическую

структуру. Отметим, что эти вопросы сегодня мало изучены и требуют дополнительного исследования.

8. Выводы

Совместный анализ гидрологических полей с применением эйлера и лагранжева подходов может быть полезным для получения более полного представления о динамике океана. В данной работе рассматривается изменчивость океанологических характеристик для района Северо-западной части Тихого океана. Анализируются пространственные распределения океанологических полей, построенные за 24 октября 2022 г.

В рамках эйлера подхода мы показали, что домены с запретом к вытягиванию мезомасштабных вихрей только частично соответствуют областям расположения крупномасштабных вихрей. Не все домены, где вытягивание вихрей запрещено, окружены соответствующим контуром, построенным при помощи алгоритма AMEDA. Также не все домены с запретом к вытягиванию вихрей соответствуют расположению центров циклонов и антициклонов, выделенных в рамках лагранжева подхода. Более того, эти домены не характеризуют локализацию основных крупномасштабных течений, например Куроисио, и распределены по области равномерно.

Вихревые структуры и элементы крупномасштабной циркуляции очень хорошо представлены на распределениях накопленного показателя Ляпунова (Λ -карты) и картах, характеризующих расстояния, пройденные частицами (S-карты). Последовательность таких карт позволяет проследить эволюцию вихревой динамики и положения струй основных циркуляционных структур. Такая информация, полученная в рамках лагранжева подхода, органично дополняет распределения океанологических параметров, построенных в рамках эйлера подхода, так как она дает возможность увидеть за предшествующий период времени историю анализируемых элементов циркуляции в данном регионе. Этот подход представляется более информативным по сравнению, например, с эйлеровыми пространственными распределениями аномалий уровня и векторов течений, где также выделяются крупномасштабные циркуляционные структуры, но все же фиксируется только мгновенная картина состояния.

Пространственные распределения кинетической и доступной потенциальной энергии являются традиционным способом анализа динамики региона. Повышенные значения кинетической и доступной потенциальной энергии соответствуют основным

структурам циркуляции в регионе. Эта информация крайне важна для анализа энергетики региона, но для анализа эволюции циркуляционных структур она малоинформативна по сравнению с распределениями показателя Ляпунова и S-картами, аккумулирующими информацию о предыдущем периоде.

Лагранжев эксперимент с пятнами пассивных маркеров показал, что в вихрях активно происходит водообмен частиц с окружающей средой.

Очевидно, что выбор того или иного подхода исследования зависит от поставленных задач. В нашем исследовании показано, что, несмотря на некоторую общность результатов, представленную на картах в пространственных распределениях различных эйлеровых и лагранжевых характеристик, имеется очень много отличий. Мы полагаем, что теоретические предсказания В. В. Жмура с соавторами (Жмур и др., 2023а, б, в) относительно «вытягивания» и «невьтягивания» вихрей в рамках сделанных допущений не могут быть полностью подтверждены лагранжевым подходом, так как они не учитывают водообмен ядра вихря с окружающей средой. В рамках эйлерова подхода ядро вихря — это «водяной мешок», который движется вместе с образующей его водой, вследствие чего вихрь переносит воду от места его зарождения на огромные расстояния. В рамках лагранжева подхода вихрь — это структура, которая активно взаимодействует с окружающей средой.

В заключение отметим, что применение лагранжева подхода к теории, разработанной В. В. Жмуром с соавторами, проводится впервые. Мы полагаем, что такого рода исследования имеют перспективу.

Литература

- Белоненко, Т. В., Колдунов, В. В., Старицын, Д. К., Фукс, В. Р., Шилов, И. О. (2009). *Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана*. СПб.: Изд-во СММО-ПРЕСС.
- Вулис, И. Л. и Монин, А. С. (1975). О доступной потенциальной энергии океана. *Доклады АН СССР*, 221 (3), 597–600.
- Жмур, В. В. (2011). *Мезомасштабные вихри океана*. М.: ГЕОС.
- Жмур, В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. (2023а). Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 508 (2), 270–274. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601675>.

- Жмур, В. В., Белоненко, Т. В., Новоселова, Е. В., Суетин, Б. П. (2023б). Условия трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением. *Океанология*, 63 (2), 200–210. <https://doi.org/10.31857/S0030157423020144>.
- Жмур, В. В., Белоненко, Т. В., Новоселова, Е. В., Суетин, Б. П. (2023в). Приложение к реальному океану теории трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением. *Океанология*, 63 (2), 211–223. <https://doi.org/10.31857/S0030157423020156>.
- Жмур, В. В., Новоселова, Е. В., Белоненко, Т. В. (2022). Особенности формирования поля плотности в мезомасштабных вихрях Лофотенской котловины. Часть 2. *Океанология*, 62 (3), 341–356. <https://doi.org/10.31857/S0030157422030170>.
- Пранц, С. В. (2021). Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 57 (4), 387–400. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040106>.
- Травкин, В. С., Белоненко, Т. В., Кочнев, А. В. (2022). Топографические волны в Курильском районе. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 19 (5), 222–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234>.
- Carton, X. (2001). Hydrodynamical modeling of oceanic vortices. *Surveys in Geophysics*, 22, 179–263. <https://doi.org/10.1023/A:1013779219578>.
- Le Vu, B., Stegner, A., Arsouze, T. (2018). Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35 (4), 739–762. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0010.1>.
- Lorenz, E. N. (1955). Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 7, 157–167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>.
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Fayman, P. A., Uleysky, M. Yu., Didov, A. A. (2023). Lagrangian Oil Spill Simulation in Peter the Great Bay (Sea of Japan) with a High-Resolution ROMS Model. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 551–568. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03197-4>.
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Uleysky, M. Yu., Zhang, J. (2015). Hyperbolicity in the Ocean. *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*, 12 (3), 257–270. <https://doi.org/10.5890/DNC.2015.09.004>.

Prants, S. V., Uleysky, M. Yu., Budyansky, M. V. (2017). *Lagrangian Oceanography*. Berlin, New York: Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53022-2>.

Zhmur, V. V., Novoselova, E. V., Belonenko, T. V. (2021). Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1. *Oceanology*, 61 (6), 830–838. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060333>.

Статья поступила в редакцию 31 июля 2023 г.

Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Новоселова Елена Владимировна — novoselovaa.elena@gmail.com;

elena.novoselova@spbu.ru

Травкин Владимир Станиславович — vtravkin99@gmail.com

Лебедева Мария Алексеевна — lebedevamasha671@gmail.com

Удалов Александр Алексеевич — udalov.aa@poi.dvo.ru

Будянский Максим Васильевич — plaztic@poi.dvo.ru

Белоненко Татьяна Васильевна — btvlisab@yandex.ru

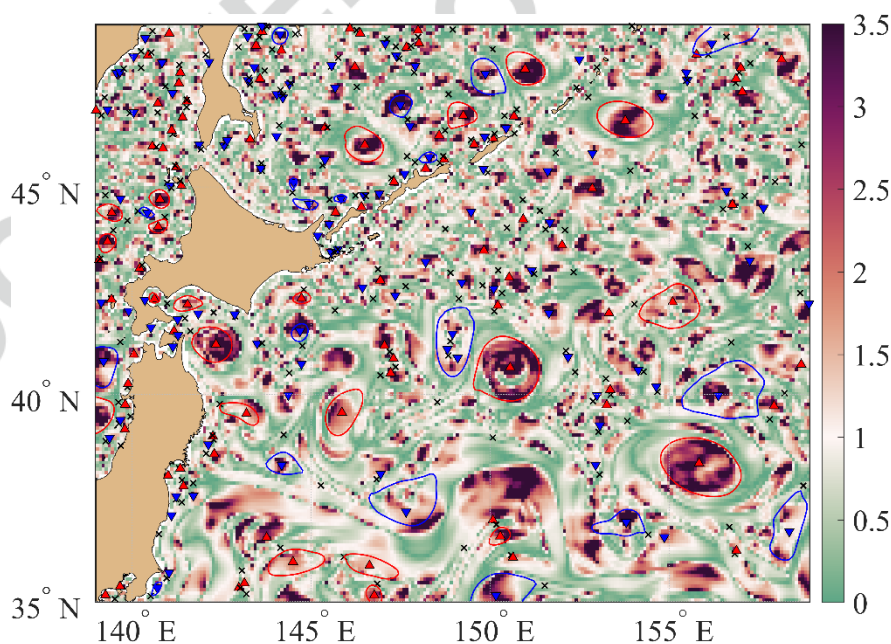


Рис. 1. Пространственное распределение значений $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ за 24 октября 2022 г. Области

$\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$, закрашенные коричневым цветом, соответствуют районам, где вытягивание вихрей запрещено. Области $\left| \frac{\gamma}{e} \right| \leq 1$, закрашенные зеленым цветом, соответствуют районам, где возможно вытягивание вихрей. Треугольники (эллиптические точки) показывают центры вихрей, контуры вихрей построены по методу AMEDA: красный цвет \blacktriangle – антициклоны, синий \blacktriangledown – циклоны. Крестики соответствуют гиперболическим точкам. Эллиптические и гиперболические точки являются стационарными (где скорость равна нулю) устойчивыми и неустойчивыми точками потока соответственно

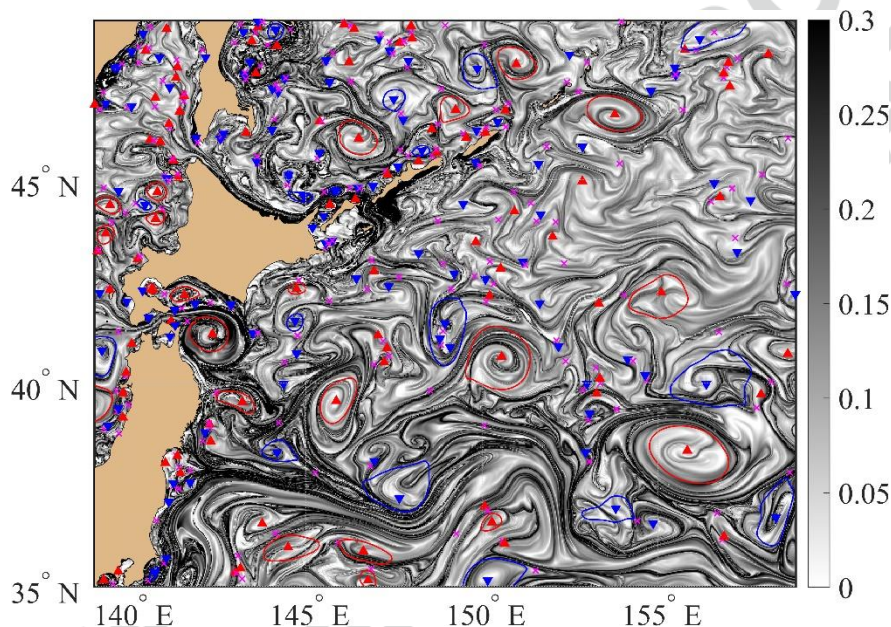


Рис. 2. Карта показателя Ляпунова (L-карта), накопленного за 15 суток в обратном времени от 24 октября 2022 г. Обозначения см. на рис. 1

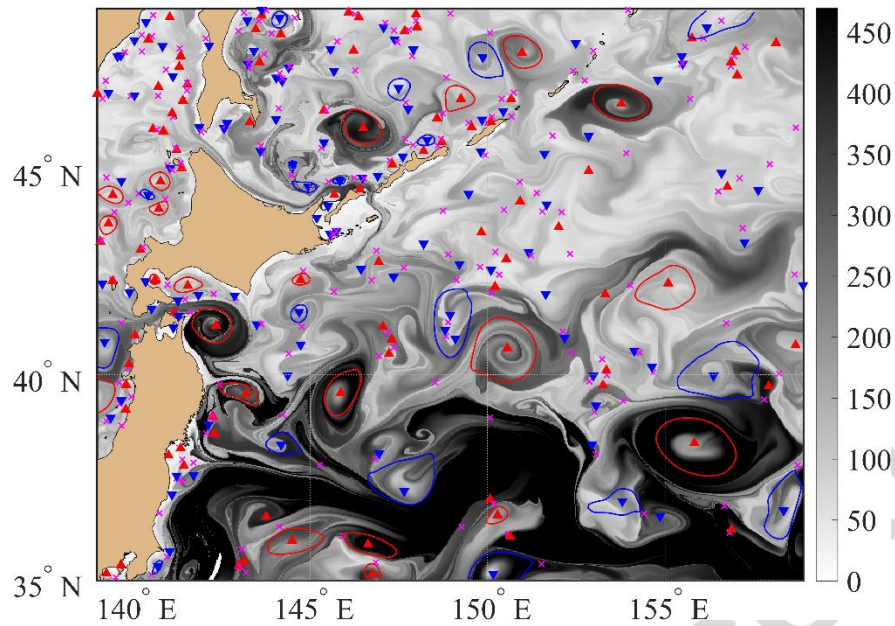


Рис. 3. S-карта, где S – лагранжев индикатор, физический смысл которого есть длина траектории (в км), пройденной частицей за 15 суток в обратном времени от 24 октября 2022 г. Обозначения см. на рис. 1

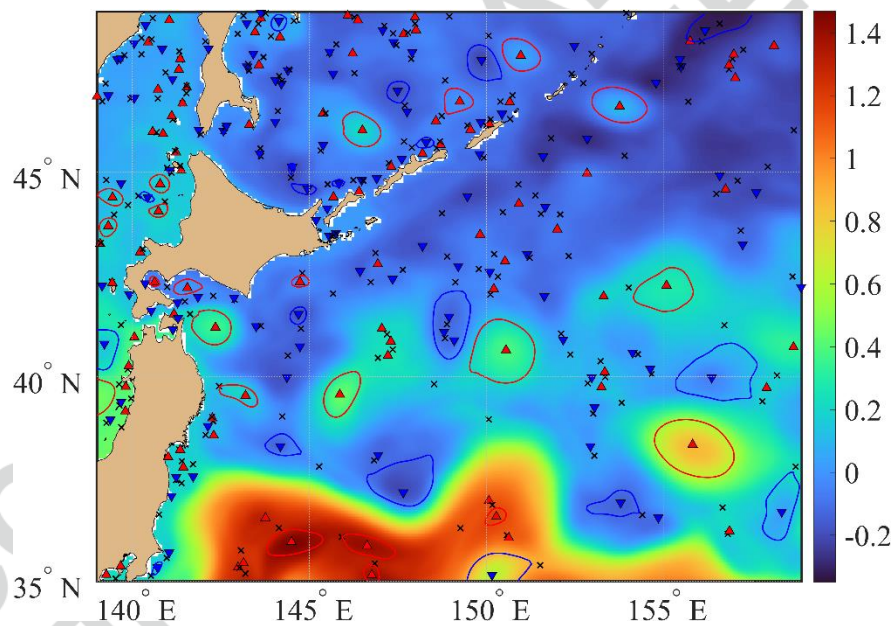


Рис. 4. Аномалии уровня (м) по данным GLORYS12V1 за 24 октября 2022 г. Обозначения см. на рис. 1

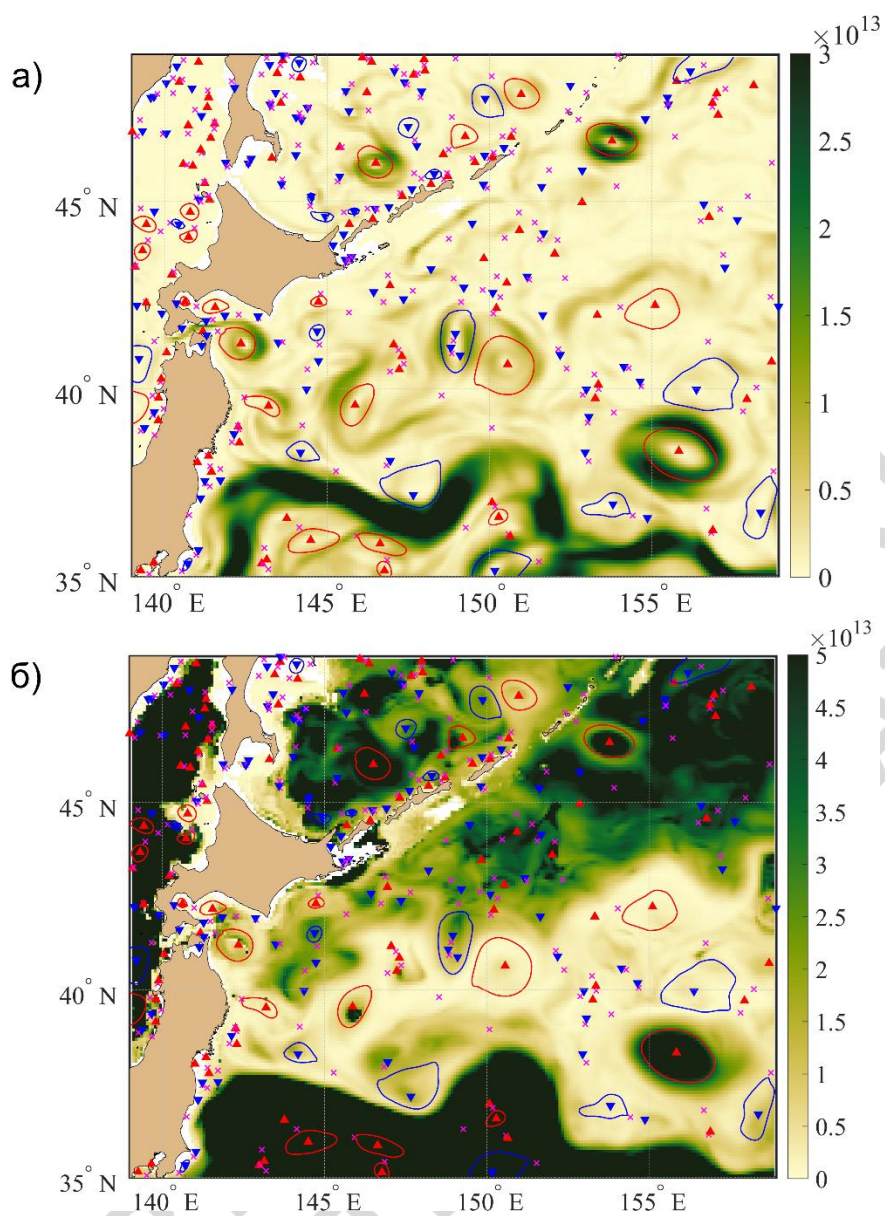


Рис. 5. Кинетическая (а) и доступная потенциальная (б) энергия (Дж).

Обозначения см. на рис. 1

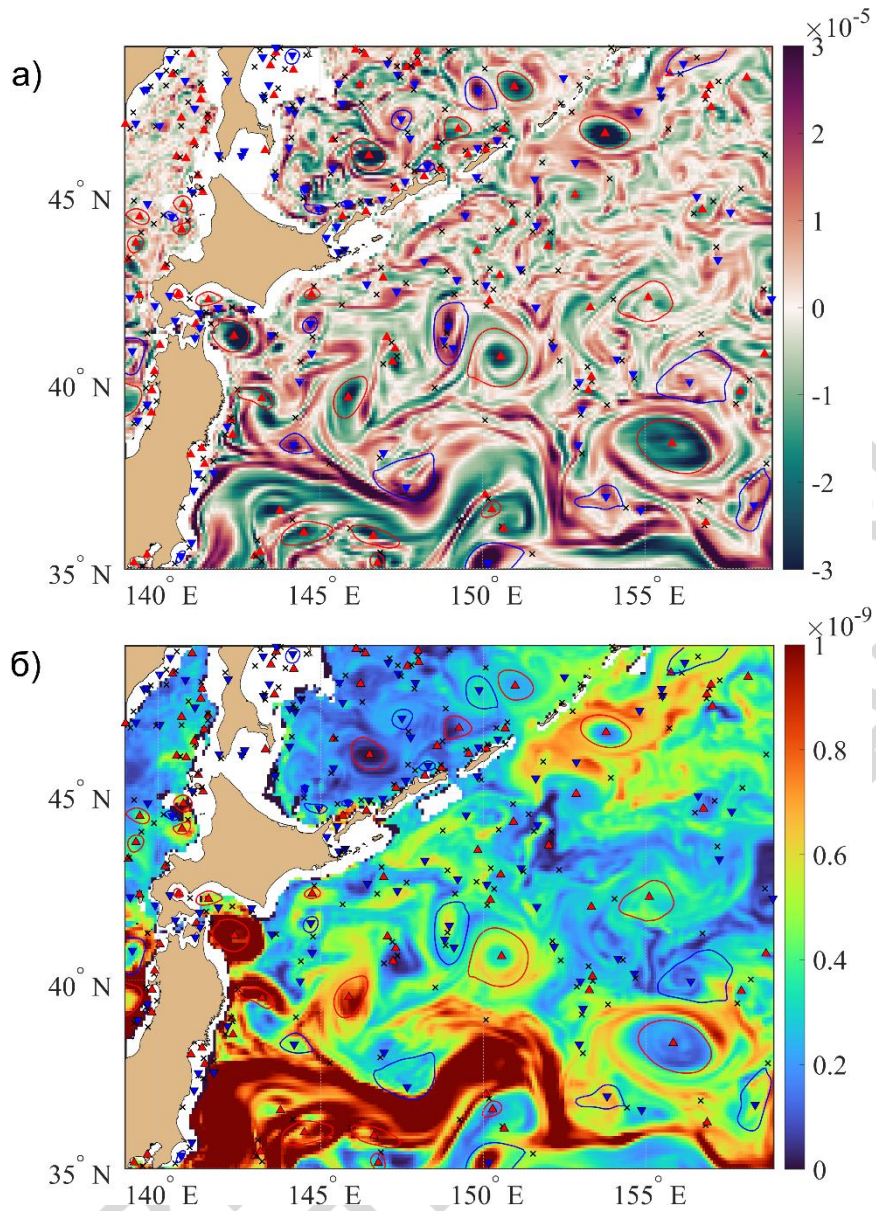


Рис. 6. Относительная завихренность, s^{-1} (а) и потенциальная завихренность, $\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ (б) на глубине 143 м за 24 октября 2022 г. Белым цветом вокруг суши изображены области, которые имеют глубину менее 143 м. Обозначения см. на рис. 1

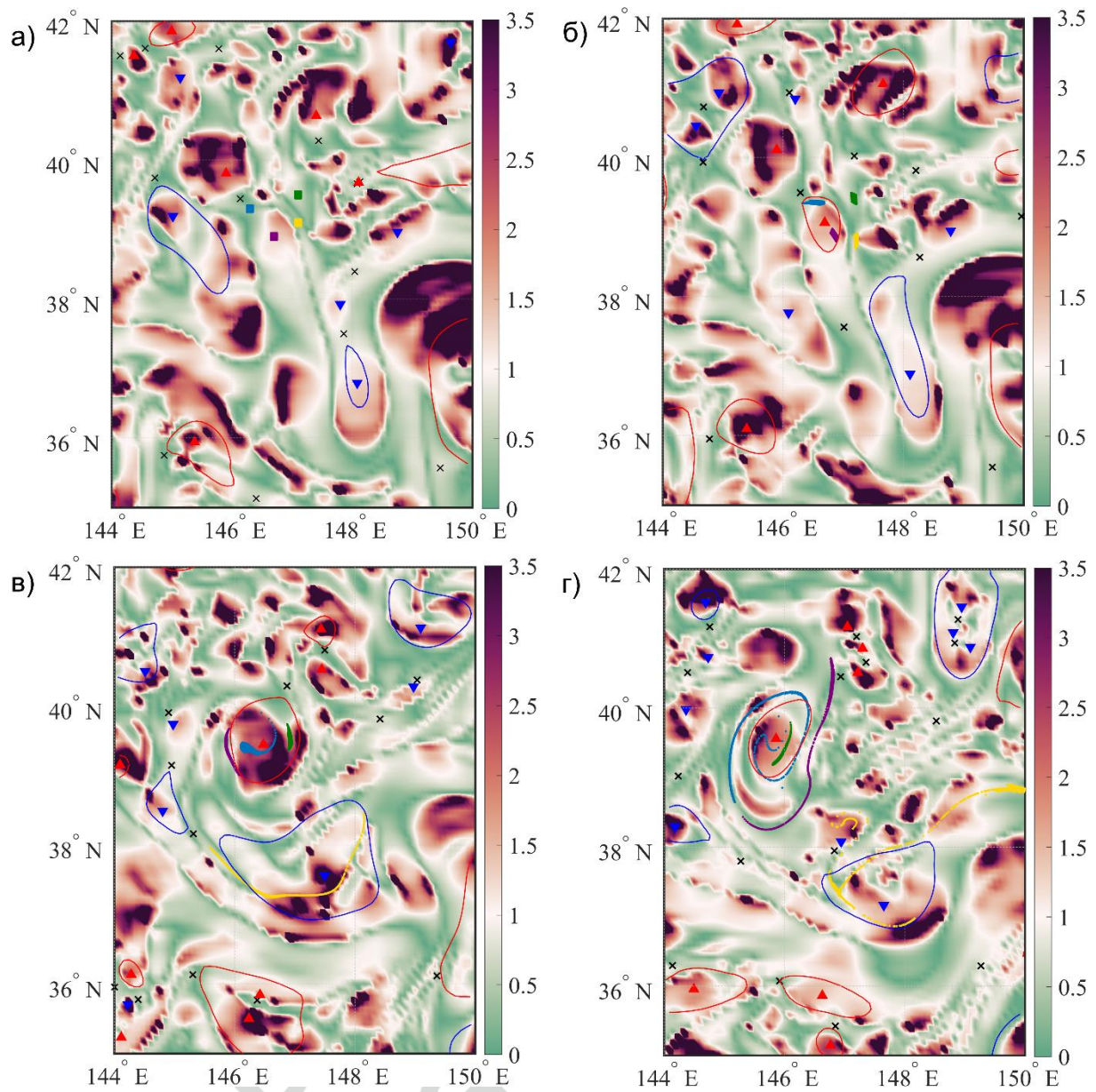


Рис. 7. Исходное расположение маркеров на карте распределений $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ 4 октября 2022 г.

(а) и их деформация к 5 (б), 14 (в) и 24 (г) октября 2022 г. Обозначения см. на рис. 1

Features of the vortex structures in the fields of Eulerian and Lagrangian hydrological characteristics for the Northwest Pacific*

*E. V. Novoselova*¹, *V. S. Travkin*^{1,2}, *M. A. Lebedeva*¹, *A. A. Udalov*³, *M. V. Budyansky*³,
*T. V. Belonenko*¹

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² State Oceanographic Institute,
6, Kropotkinsky per., Moscow, 119034, Russian Federation

³ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
43, ul. Baltiyskaya, Vladivostok, 690041, Russian Federation

For citation: Novoselova, E. V., Travkin, V. S., Lebedeva, M. A., Udalov, A. A., Budyansky, M. V., Belonenko, T. V. (2024). Features of the vortex structures in the fields of Eulerian and Lagrangian hydrological characteristics for the Northwest Pacific. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2).
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.209> (In Russian)

This work presents a combined analysis of the spatial distributions of oceanographic fields based on Eulerian and Lagrangian approaches. In the Eulerian approach, the fluid motion is considered as a function of coordinates and time, and the equations of motion are formulated for specific points in space. In contrast, the Lagrangian approach focuses on tracking individual particles in the ocean, representing water masses or other materials, as separate objects moving according to the equations of motion. The variability of oceanographic characteristics in the Northwest Pacific region is examined, specifically analyzing the spatial distributions of oceanographic fields on October 24, 2010. The AMEDA algorithm is used to identify mesoscale eddies. Within the Eulerian approach, it is shown that regions prohibiting the stretching of mesoscale eddies only partially correspond to areas where large-scale eddies are located. Vortical structures and elements of large-scale circulation are well manifested in the distributions of the Lyapunov exponent (Λ -maps) and maps characterizing the trajectories of advected

* This study was supported by the St. Petersburg University (grant no. 116442164).

particles (S-maps). Enhanced values of kinetic and available potential energy correspond to the main circulation structures in the region. However, for analyzing the evolution of circulation structures, they are less informative compared to Λ -maps and S-maps, which accumulate information from the previous period. Spatial distributions of relative and potential vorticity are constructed. Positive values of relative vorticity outline the Kuroshio current from the north, while negative values outline it from the south, which is typical of jet currents with a pronounced zonal component. Mesoscale eddies exhibit elevated values of vorticity and a shielding effect (shielded vortices). In the Lagrangian experiment with passive tracer patches, it is demonstrated that the most deformation-resistant patch spent most of the analyzed time interval in a domain where the stretching of eddies is prohibited.

Keywords: Eulerian approach, Lagrangian approach, Northwest Pacific, GLORYS12V, mesoscale vortices, Kuroshio Current, Oyashio current, passive tracers.

References

- Belonenko, T. V., Koldunov, V. V., Staricyn, D. K, Fuks, V. R., Shilov, I. O. (2009). *Northwestern Pacific Ocean level variability*. St. Petersburg: SMIO-PRESS Publ. (In Russian)
- Carton, X. (2001). Hydrodynamical modeling of oceanic vortices. *Surveys in Geophysics*, 22, 179–263. <https://doi.org/10.1023/A:1013779219578>
- Le Vu, B., Stegner, A., Arsouze, T. (2018). Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35 (4), 739–762. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0010.1>
- Lorenz, E. N. (1955). Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 7, 157–167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>
- Prants, S. V. (2021). Trench eddies in the Northwest Pacific: an overview. *Izvestiya, atmospheric and oceanic physics*, 57 (4), 387–400. <https://doi.org/10.1134/S0001433821040216>
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Fayman, P. A., Uleysky, M. Yu., Didov, A. A. (2023). Lagrangian Oil Spill Simulation in Peter the Great Bay (Sea of Japan) with a High-Resolution ROMS Model. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 551–568. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03197-4>

- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Uleysky, M. Yu., Zhang, J. (2015). Hyperbolicity in the Ocean. *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*, 12 (3), 257–270. <https://doi.org/10.5890/DNC.2015.09.004>
- Prants, S. V., Uleysky, M. Yu., Budyansky, M. V. (2017). *Lagrangian Oceanography*. Berlin, New York: Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53022-2>
- Travkin, V. S., Belonenko, T. V., Kochnev, A. V. (2022). Topographic waves in the Kuril region. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 19 (5), 222–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234>. (In Russian)
- Vulis, I. L. and Monin, A. S. (1975). On the available potential energy of the ocean. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 221(3), 597-600. (In Russian)
- Zhmur, V. V. (2011). *Mesoscale vortices of the ocean*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Zhmur, V. V., Belonenko, T. V., Novoselova, E. V., Suetin B. P. (2023a). Direct and Inverse Energy Cascades in the Ocean during Vortex Elongation. *Doklady Earth Sciences*, 508 (2), 233–236. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601675>
- Zhmur, V. V., Belonenko, T. V., Novoselova, E. V., Suetin, B. P. (2023b). Conditions for Transformation of a Mesoscale Vortex into a Submesoscale Vortex Filament When the Vortex Is Stretched by an Inhomogeneous Barotropic Flow. *Oceanology*, 63 (2), 174–183. <https://doi.org/10.1134/S0001437023020145>
- Zhmur, V. V., Belonenko, T. V., Novoselova, E. V., Suetin, B. P. (2023c). Application to the World Ocean of the Theory of Transformation of a Mesoscale Vortex into a Submesoscale Vortex Filament When the Vortex Is Elongated by an Inhomogeneous Barotropic Flow. *Oceanology*, 63 (2), 184–194. <https://doi.org/10.1134/S0001437023020157>
- Zhmur, V. V., Novoselova, E. V., Belonenko, T. V. (2021). Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1. *Oceanology*, 61 (6), 830–838. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060333>
- Zhmur, V. V., Novoselova, E. V., Belonenko, T. V. (2022). Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 2. *Oceanology*, 62 (3), 289–302. <https://doi.org/10.1134/S0001437022030171>

Received: July 31, 2023

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Elena V. Novoselova — novoselovaa.elena@gmail.com

Vladimir S. Travkin — vtravkin99@gmail.com

Maria A. Lebedeva — lebedevamasha671@gmail.com

Aleksandr A. Udalov — udlov.aa@poi.dvo.ru

Maxim V. Budyansky — plaztic@poi.dvo.ru

Tatyana V. Belonenko — btvlisab@yandex.ru

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ