

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 684—698.  
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):684—698.

Научная статья  
УДК 551.465.4(261.7)  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698

## **Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины**

*Алина Анатольевна Малышева, Татьяна Васильевна Белоненко*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
alinamalysheva97@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей Капской котловины при вытягивании фоновым потоком на основе данных океанического реанализа GLORYS12v1. Обсуждается эволюция вихрей разной полярности в течение 7 дней. Показано, что в процессе вытягивания длина вихрей превосходит ширину в среднем в 4 раза. Вытянувшись по горизонтали, вихри становятся филаментами. Максимальные значения энергии соответствуют круглой форме вихря, а минимальные — филаменту. Доступная потенциальная энергия за 7 дней вытягивания вихрей уменьшается в 3 раза для антициклона и в 1,5 — для циклона, а кинетическая энергия в среднем уменьшается в 1,3 раза. Также при вытягивании вихрей растет параметр вертикальной сплюснутости, что связано с частотой Вьяйсяля-Брента и усилением стратификации вод.

*Ключевые слова:* Агульяс, мезомасштабные вихри, GLORYS12v1, потенциальная энергия, кинетическая энергия, Капская котловина.

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда 22-27-00004.

*Для цитирования:* Малышева А. А., Белоненко Т. В. Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 684—698. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698.

Original article

## **Variability of potential and kinetic energy of mesoscale eddies in the Cape Basin**

*Alina A. Malysheva, Tatyana V. Belonenko*

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*Summary.* It is well known that mesoscale eddies when interacting with a barotropic flow, can undergo rotation and complete elongation. One of the most stable and long-lived eddies, situated in the Cape Basin southwest of Africa, is also subject to this phenomenon, known as elongation. This study aims to analyze the evolution of kinetic and potential energy within the Cape Basin eddies as they deform due to the background flow. We examine the evolution of eddies with different polarities over a 7 day.

By considering two mesoscale eddies within the Cape Basin, we observe that during the elongation process, these eddies change their parameters, with their longitudinal scale increasing on average by a factor of four compared to their transverse scale. Eventually, these elongated eddies transform into filaments. We calculate the kinetic and potential energy of these eddies using the Global Ocean Physics Reanalysis GLORYS12v1 dataset. Our analysis reveals that the maximum energy values correspond to eddies with a circular shape, while the minimum values are associated with horizontally elongated eddies. Consequently, an increase in the elongation parameter  $\varepsilon$  leads to a decrease in energy. Over a 7-day period of eddy stretching, the potential energy decreases by a factor of 3 for anticyclonic eddies and by a factor of 1.5 for cyclonic eddies. The kinetic energy, on average, decreases by a factor of 1.3. It's worth noting that during the evolution of these eddies, the compression parameter increases in proportion to the Väisälä-Brunt frequency, which is linked to heightened water stratification.

*Keywords:* Agulhas, mesoscale eddies, GLORYS12v1, potential energy, kinetic energy, Cape Basin.

*Acknowledgments:* The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project 22-27-00004.

*For citation:* Malysheva A. A., Belonenko T. V. Variability of potential and kinetic energy of mesoscale eddies in the Cape Basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):684—698. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698.

## Введение

Мезомасштабные вихри играют важную роль в океанической циркуляции. Они обладают собственной динамикой, в которой доминируют нелинейные эффекты. Вихри способны переносить тепло, массу, кинетическую энергию и биохимические характеристики из области своего образования на значительные расстояния, оказывая влияние на климат [1—4]. Несмотря на повсеместное распространение мезомасштабных вихрей [5], районы вихревой активности, как правило, приурочены к областям крупномасштабных течений, бароклинная и баротропная неустойчивость которых является причиной генерации мезомасштабных вихрей в океане. Другой важной причиной их генерации является взаимодействие вихрей друг с другом, деление, слияние вихрей и трансформация.

Регион, расположенный к юго-западу от африканского континента, характеризуется повышенным вихреобразованием. Здесь мезомасштабные вихри могут генерироваться и дрейфовать, взаимодействуя с течением Агульяс [6—8]. Д. Олсон и Р. Эванс [9] показали, что вихри течения Агульяс в среднем имеют диаметр  $240 \pm 40$  км, орбитальная скорость колеблется от 30 см/с до 90 см/с, скорость дрейфа варьируется от 5,5 см/с до 9 см/с (от 5 до 8 км/сут). Эти вихри, имея большой водообменный потенциал, способны преодолевать тысячи километров, являясь доминирующими структурами, переносящими теплые и соленые воды Индийского океана в Атлантический. Данное явление меж океанского обмена, называемое также Агульясовым переносом, может оказывать существенное влияние на колебания климата [1, 3]. Переносимые в Южную Атлантику воды состоят в основном из верхних и средних вод Индийского океана [10]. Таким образом, вихри Агульяс пересекают Южную Атлантику, питая при этом поверхностные воды атлантической меридиональной термохалинной циркуляции теплыми и солеными водами Индийского океана [11—13].

Агульясов перенос также влияет на общую циркуляцию в Атлантическом океане посредством создания изопикнических неоднородностей, которые производят

возмущения в виде медленно распространяющихся волн Россби, проявляющихся в виде систем когерентных мезомасштабных вихрей, движущихся на запад [2, 13].

Теоретические исследования показали, что при взаимодействии вихрей с баротропным потоком существует три варианта поведения мезомасштабных вихрей: вращение, нутационные колебания и неограниченное вытягивание [14]. Эволюция вихрей путем вытягивания сопровождается потерей кинетической и доступной потенциальной энергии [15]. Вытянутый вихрь в теоретических исследованиях называют вихревой нитью, а при анализе спутниковой или натурной информации — филаментом. Термин «филамент» широко используется в океанологических исследованиях [14].

Механизмы образования филаментов известны и описывались во многих работах [16—19]. В работе [15] рассмотрена эволюция мезомасштабного антициклонического вихря, расположенного в Лофотенской котловине, который, будучи изначально круглым в горизонтальном плане, постепенно превратился в филамент. Процесс эволюции авторы наблюдали на последовательных картах, построенных по данным реанализа, в течение трех недель. Авторы отмечают практически линейное уменьшение энергии при вытягивании вихря.

Возникает вопрос, можно ли наблюдать вытягивание вихрей в области Капской котловины, расположенной к юго-западу от Африки, где вихри являются более устойчивыми и долгоживущими? В работе [20] проанализировано 28018 циклонов и 26478 антициклонов и показано, что антициклоны Агульясова переноса, являясь более долгоживущими, чем циклоны, перемещаются на северо-запад почти прямолинейно и, преодолевая тысячи километров, пересекают Южную Атлантику. Отмечается следующая закономерность: антициклоны при своем движении на запад под действием бэта-эффекта отклоняются к экватору, а циклоны — к Южному полюсу. Предлагаются различные физические механизмы этого явления, обсуждение которых можно найти в работе [20].

В.В. Жмур и др. [14, 21] теоретически показали, что в океане существуют области, где запрещено вытягивание вихрей и где имеется потенциальная возможность к их вытягиванию. При наличии данных о течениях в океане можно на картах построить географические распределения этих областей и рассчитать их площади. Авторы построили такие распределения для различных регионов Мирового океана и показали, что интегральная площадь областей, где вихри могут вытягиваться, превышает площади, где вытягивание вихрей отсутствует.

Анализируя радиолокационные снимки поверхности океана, можно наблюдать множество филаментов. Есть основания предполагать, что часть из них образовалась в процессе вытягивания мезомасштабных вихрей (см. пример [21]). Однако задача — проанализировать трансформацию вихрей на основе натуральных наблюдений — является практически неразрешимой и опирается в отсутствие соответствующей информации о течениях с необходимым пространственным разрешением данных. Тем не менее, в работе [15] рассматривается эволюция вихря путем вытягивания по данным реанализа GLORYS12V1 и проанализировано изменение его кинетической и доступной потенциальной энергии. В настоящей работе также применяются данные реанализа GLORYS12V1 и рассматриваются два

новых примера, демонстрирующих вытягивание вихрей. Таким образом, целью данной работы является анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе вытягивания, расположенных в Капской котловине.

### Данные

Основным источником данных в нашем исследовании является вихревой реанализ Мирового океана GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis), доступный на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Массив включает в себя такие параметры, как температура, соленость, скорость течений, высота поверхности моря и другие. Реанализ основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. GLORYS12V1 ассимилирует спутниковые и *in situ* данные. Основой реанализа является модель NEMO, где в качестве форсинга используется атмосферный реанализ ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). В уравнениях модели применяется приближение Буссинеска. Различные типы наблюдений ассимилируются с использованием фильтра Калмана (SEIK — Singular Evolutive Extended Kalman). Аномалии уровня моря (SLA) получены с помощью спутникового альтиметра, температура поверхности моря (SST) — со спутника AVHRR из NOAA, а вертикальные профили температуры и солености (T/S) *in situ* из базы данных CORA с контролем качества CMEMS. В качестве эталона для ассимиляции альтиметрических данных также использовалась «гибридная» средняя динамическая топография (MDT), основанная на CNES-CLS13 MDT.

Пространственное разрешение данных составляет  $1/12^\circ$  на 50 уровнях за период, когда доступны альтиметрические наблюдения. Временная дискретность — одни сутки.

### Результаты

Последние исследования, связанные с деформацией вихрей при взаимодействии с фоновым течением (например, [15, 18]), показали, что мезомасштабные вихри в определенных случаях могут быть вытянуты в филаменты, и, вытягиваясь, вихри перераспределяют тем самым энергию с мезомасштаба на субмезомасштаб. Как известно, мезомасштабные и субмезомасштабные процессы имеют различный пространственный размер. Как критерий оценки масштаба явления используют бароклиный радиус деформации Россби:

$$R_d = \frac{N^*}{f} H,$$

где  $f$  — параметр Кориолиса,  $N^*$  — характерное значение частоты Вайсяля-Брента,  $H$  — вертикальный размер явления. Если горизонтальный размер явления ( $L$ )  $< R_d$ , то явление относится к субмезомасштабу, если  $L > R_d$  — к мезомасштабу. Для описания масштабов также используется число Россби, являющееся отношением сил инерции к силе Кориолиса:

$$R_0 = \frac{U}{fL},$$

где  $U$  — горизонтальная составляющая скорости,  $L$  — горизонтальный размер.

Для больших масштабов  $L$  число Россби мало:  $Ro < 1$ . Из формулы также следует, что при уменьшении горизонтального размера число Россби возрастает. Переход явления к субмезомасштабу приводит к большим числам Россби и агеострофическому ускорению.

Для того, чтобы оценить поведение вихрей Капской котловины при вытягивании, были рассчитаны две основные динамические характеристики вихрей: относительная ( $\zeta$ ) и потенциальная по Эртелю ( $PV$ ) завихренности:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

где  $u$  и  $v$  — зональная и меридиональная составляющие скорости потока, ось координат правая: ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  — на север,  $z$  — вертикальная ось.

$$PV = \frac{(\zeta + f) \frac{\partial p}{\partial z}}{\rho_0},$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $\rho_0$  — референтная плотность воды, здесь  $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$ . Для расчета производных использовалась прямая разностная схема. Одним из ключевых свойств потенциальной завихренности является выполнение теоремы о проницаемости [22, 23]: чистый перенос  $PV$  через изопикнические поверхности отсутствует, следовательно, выполняется закон сохранения потенциальной завихренности, который является аналогом закона сохранения количества движения. Но так как системы в океане не замкнуты, потенциальная завихренность изменяется в процессе эволюции вихрей наравне с изменениями других динамических и кинематических характеристик.

Для исследования было построено и проанализировано множество полей потенциальной завихренности по Эртелю на наличие вихрей, способных к вытягиванию. Среди прочих было найдено два вихря различной полярности, располагающихся на наименьшем расстоянии друг от друга и вытягивающихся практически одновременно, что является репрезентативным. На рис. 1 и 2 показаны два вихря в начальный и конечный момент их эволюции путем вытягивания. Один из вихрей — антициклон, другой — циклон. Эти два вихря различной полярности, которые продемонстрировали способность к вытягиванию в филаменты в течение 7 дней, и были выбраны для дальнейшего анализа в качестве примера. Центры вихрей на начальный момент времени расположены на  $9^\circ$  в. д. и  $39.2^\circ$  ю. ш. (антициклон) и на  $12^\circ$  в. д. и  $36.5^\circ$  ю. ш. (циклон). Стоит отметить, что для выбранных вихрей значения числа Россби варьируются в диапазоне от 0,03 до 0,05, что является довольно малым значением, это говорит о большой нелинейности вихрей. На рис. 1 и 2 видно, что происходит изменение формы этих вихрей: если на начальную дату наблюдений (19.12.2001) вихри имеют форму эллипсов, то в конце

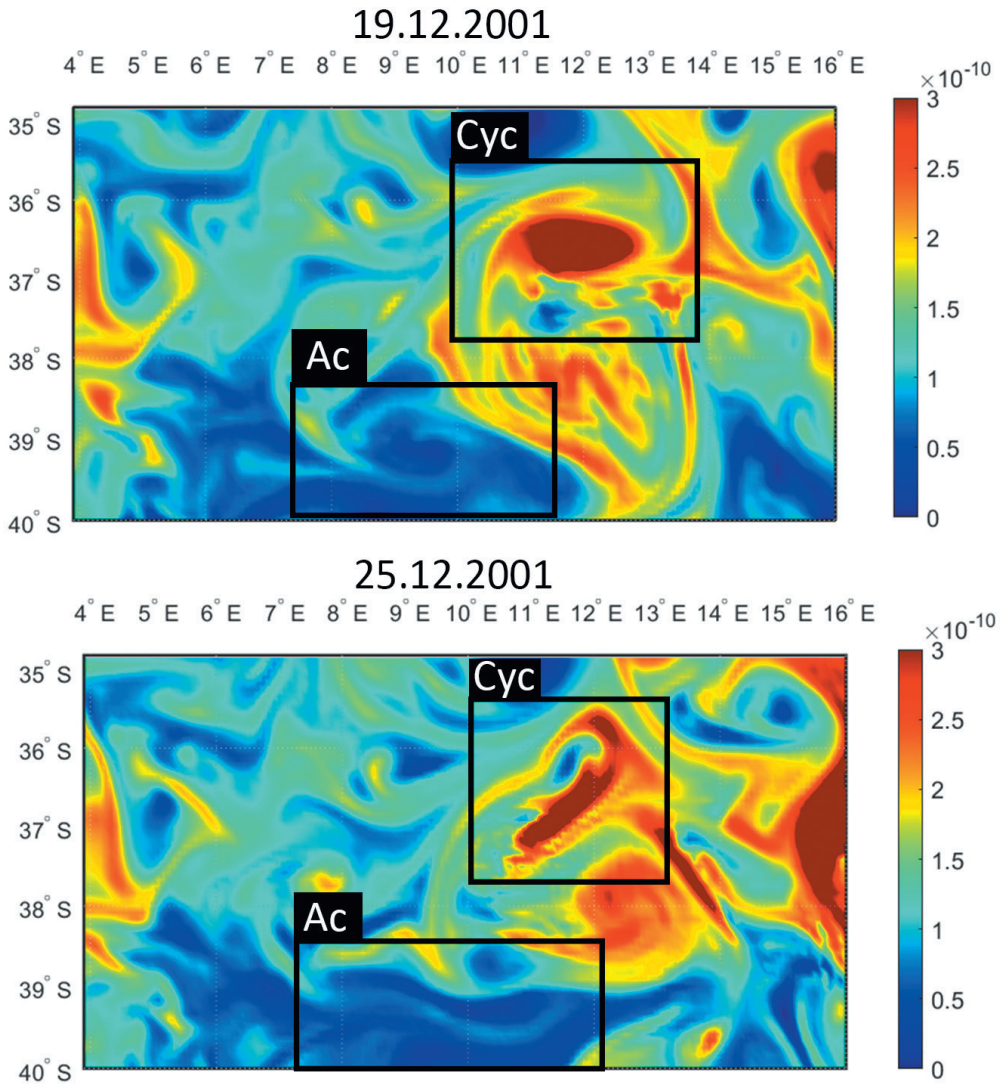


Рис. 1. Потенциальная завихренность по Эртлю ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон (Ac) и циклон (Cyc). Горизонт наблюдений — 200 м.

Fig. 1. Potential vorticity according to Ertel ( $\text{m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) at the initial (December 19, 2001) and final moments (December 25, 2001) of the evolution of initially round in horizontal plan vortices into filaments. The anticyclone (Ac) and cyclone (Cyc) are highlighted by black rectangles. Observation depth — 200 m.

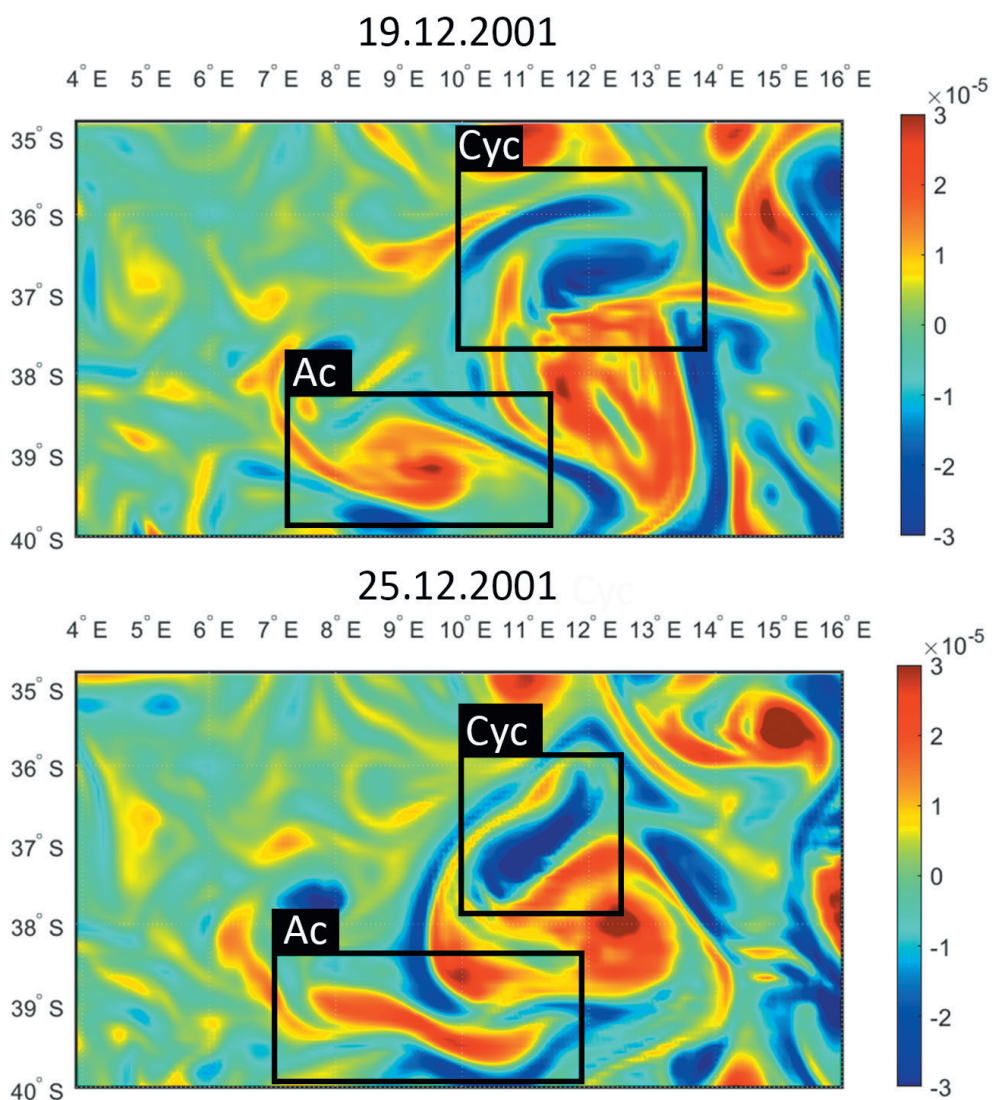


Рис. 2. Относительная завихренность ( $s^{-1}$ ) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон Ac (положительные значения) и циклон Cys (отрицательные значения относительной завихренности). Горизонт наблюдений — 200 м.

Fig. 2. Relative vorticity ( $s^{-1}$ ) at the initial (December 19, 2001) and final moments (December 25, 2001) of initially round in horizontal plan vortices into filaments. Black rectangles highlight the anticyclone (Ac) with positive vorticity values and the cyclone (Cys) with negative relative vorticity values. The observation depth is 200 m.

периода наблюдений (25.12.2001) вихри вытягиваются так, что длина превосходит ширину в 4,5 раза для антициклона и в 3,5 раза — для циклона.

В работе В. В. Жмур и др. [21] рассматривается различное поведение мезомасштабных вихрей при их взаимодействии с баротропным потоком. По данным океанического реанализа при использовании параметров, которые описывают пространственную изменчивость фонового течения: угловую скорость вращения жидких частиц в фоновом течении ( $\gamma$ ) и коэффициент деформации фонового течения ( $e$ ), — авторы проанализировали зависимость  $\gamma$  от  $e$  ( $\gamma/e$ ). По данному соотношению определяются области, где допустимо вытягивание вихрей в филаменты и где такого вытягивания не происходит. Применение данной теории к различным регионам Мирового океана представлено в работе [21].

На рис. 3 дано распределение коэффициентов  $\gamma/e$  в области Капской котловины на 25.12.2001, что соответствует конечной дате наблюдения за вихрями, их максимальному вытягиванию. Если соотношение  $|\gamma/e| \leq 1$  справедливо в каком-то районе, то в этом районе разрешено неограниченное вытягивание вихрей. В другом случае при  $|\gamma/e| > 1$  вытягивание запрещено. Если в зоне разрешено неограниченное вытягивание вихрей, то часть имеющихся вихрей вытянутся в филаменты. На рис. 3 красный цвет соответствует областям, где вытягивание вихрей в филаменты запрещено, синий цвет — где разрешено неограниченное вытягивание вихрей. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей (см. рис. 1 и 2). Можно увидеть, что там, где происходит вытягивание антициклонического вихря (центр вихря), область окрашена голубым цветом, то есть вытягивание разрешено. Обе же части, на которые вихрь разделился, напротив, окрашены красным, они не вытягиваются. В зоне циклона наблюдается та же ситуация: вытягивающийся центр вихря окрашен в синий, а части вихря, которые в итоге при вытягивании отделяются от материнского вихря, обозначены красным. Таким образом, мы наблюдаем вытягивание вихрей и дальнейшее преобразование их в вихри меньших масштабов. При этом происходит перераспределение энергии с мезомасштаба на субмезомасштаб.

Основными параметрами, характеризующими вытянутость вихрей, являются безразмерный параметр вытянутости  $\varepsilon = \frac{a}{b} \geq 1$  и эффективный радиус  $r_0 = \sqrt{ab}$ , где

$a$  — большая горизонтальная полуось вихря,  $b$  — малая горизонтальная полуось. На рис. 4 представлен график изменения  $\varepsilon$  и  $r_0$  по мере вытягивания вихрей. На начальный момент времени  $\varepsilon = 1$  для  $A_c$  и 1,2 для  $S_{uc}$ , так как вихри практически круглые. При вытягивании вихрей параметр вытянутости растет, так как длина значительно превосходит ширину, эффективный радиус, в свою очередь, растет на 17 % для антициклона и на 6 % — для циклона.

На рис. 5 представлены графики безразмерного параметра вертикальной сплюснутости ядра вихря  $K = \frac{Nc}{fr_0}$ , где  $c$  — вертикальная полуось вихря, и частоты

Вайсяля-Брента ( $N$ ). Видно, что параметр  $K$  согласован с частотой Вайсяля-Брента. В течение эволюции вихрей параметры пропорционально растут. Увеличение частоты Вайсяля-Брента связано с усилением стратификации вод.



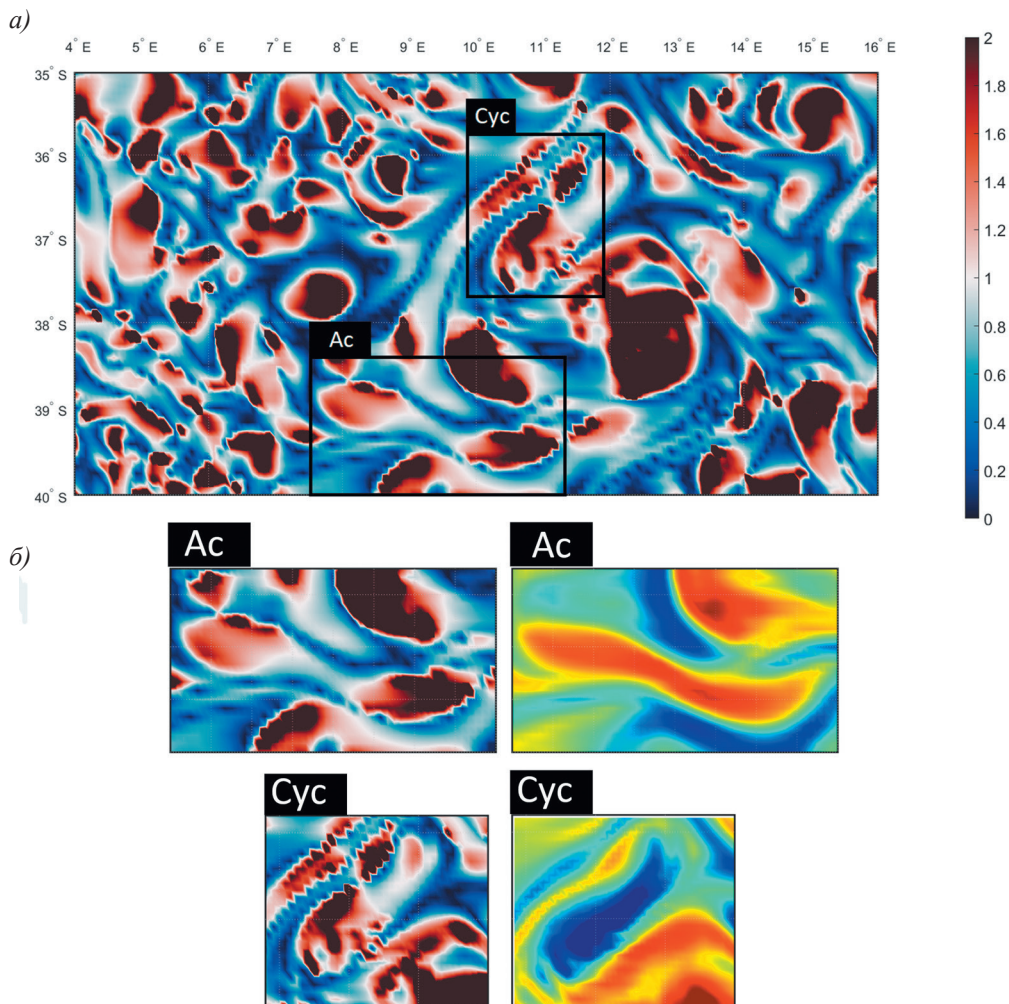


Рис. 3. Распределение коэффициентов  $\gamma/e$  ( $c^{-1}$ ) в районе Капской котловины на 25.12.2001 г. Горизонт — 200 м. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей. Ac — антициклон, cyc — циклон (a); б) — приближенные фрагменты вихрей в поле коэффициентов  $\gamma/e$  (слева) в сравнении с теми же вихрями в поле относительной завихренности (справа).

Fig. 3. Distribution of coefficients  $\gamma/e$  ( $s^{-1}$ ) in the region of the Cape Basin on December 25, 2001. The depth is 200 m. The black rectangles indicate the locations of the eddies selected for analysis. Ac is the anticyclone, cyc is the cyclone (a); b) approximate fragments of the eddies in the field of coefficients  $\gamma/e$  (left) in comparison with the same eddies in the field of relative vorticity (right).

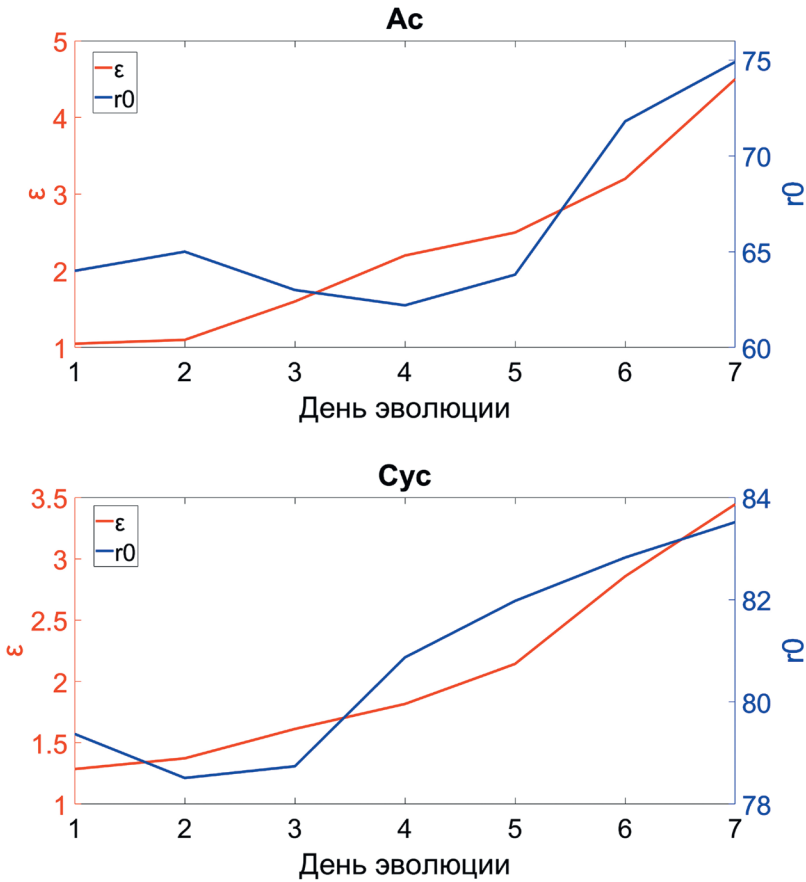


Рис. 4. Безразмерный параметр вытянутости вихрей  $\varepsilon$  (красным) и их эффективный радиус (синим). Антициклон — Ac, Cys — циклон. По оси x показаны дни эволюции вихря от начала наблюдений с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 4. Dimensionless parameter of eddy elongation  $\varepsilon$  (red) and their effective radius (blue). Anticyclone — Ac, Cys — cyclone. The x-axis shows the days of eddy evolution from the beginning of observations from 12/19/2001 to 12/25/2001.

Далее оцениваем потенциальную и кинетическую энергию двух вихрей отдельно. Потенциальная энергия рассчитывалась по формуле:

$$EP=0,5 \iiint \left[ \frac{g^2 \rho^2(x,y,z)}{\rho_0(z)N^2(x,y,z)} dx dy dz \right],$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho = (\rho_\Sigma - \rho_0)$  — отклонение текущей плотности  $\rho_\Sigma$  от  $\rho_0$ . Масштабы вихря определяют границы интегрирования: изолинии нулевой относительной завихренности показывают горизонтальные границы, вертикальные — от 0 до 1000 м.

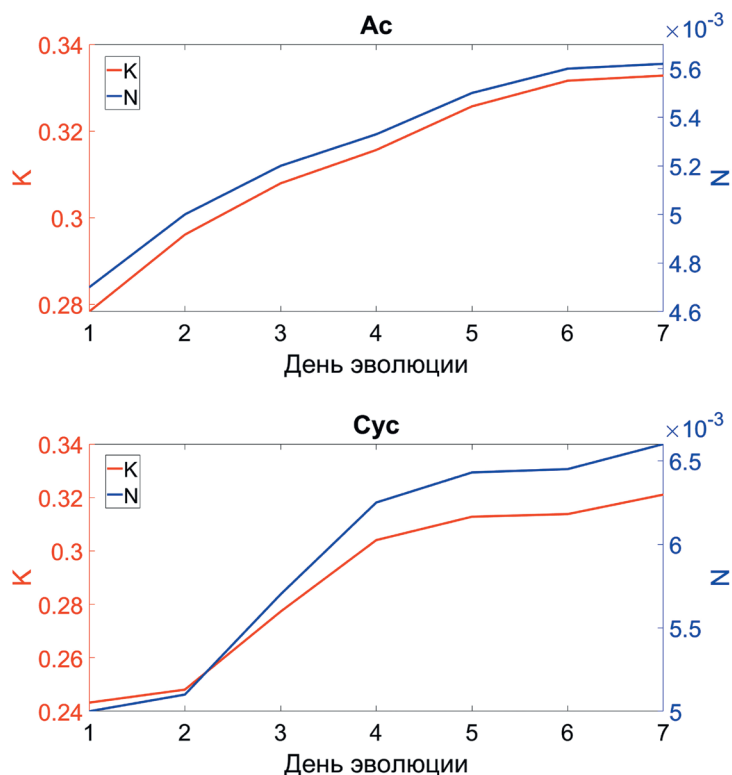


Рис. 5. Безразмерный параметр вертикальной сплюснутости вихревого ядра ( $K$ ) (красный цвет) и частота Вэйсälä-Брента ( $N$ ) (синий цвет) вихрей (антициклон  $Ac$  и циклон  $Cyc$ ). По оси  $x$  показаны дни эволюции вихря в период с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 5. The dimensionless parameter of vertical vortex core flattening ( $K$ ) is depicted in red, while the Väisälä-Brent frequency ( $N$ ) is shown in blue for both anticyclone ( $Ac$ ) and cyclone ( $Cyc$ ). The  $x$ -axis represents the days of vortex evolution during the period from December 19, 2001, to December 25, 2001.

Для кинетической энергии использовалась формула [17]:

$$EK=0,5 \iiint \left[ \rho_{\Sigma}(x,y,z) \left( u^2(x,y,z) + v^2(x,y,z) \right) \right] dx dy dz.$$

На рис. 6 видно, что потенциальная энергия антициклонического вихря на 3 порядка больше его кинетической энергии. С течением времени и при вытягивании формы антициклона энергия уменьшается. У циклонического вихря наблюдается та же ситуация: потенциальная энергия уменьшается по мере вытягивания вихря, причем кинетическая энергия на 1 порядок меньше потенциальной. Важно уточнить, что последний день наблюдений не является днем диссипации вихря, а является днем максимального вытягивания формы. Таким образом, с изменением формы циклонического и антициклонического вихря его кинетическая и потенциальная энергия убывает. Максимальные значения энергии соответствуют

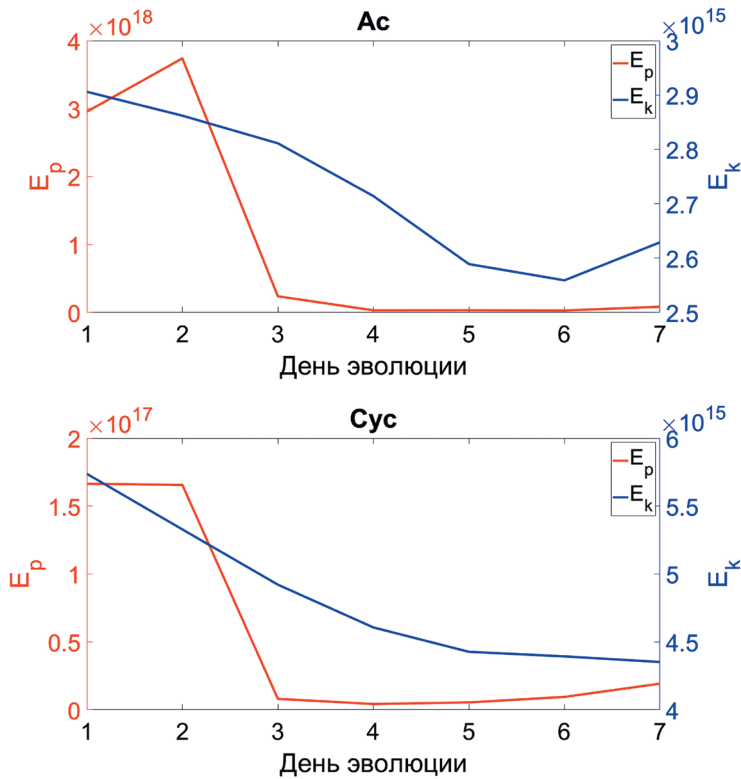


Рис. 6. Доступная потенциальная (красный цвет) и кинетическая (синий цвет) энергия вихрей (Дж). По оси x показаны дни эволюции вихрей в период с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 6. The available potential energy (in red) and kinetic energy (in blue) of vortices (Joules). The x-axis represents the days of vortex evolution during the period from December 19, 2001, to December 25, 2001.

круглой форме вихрей обеих полярностей, а минимальные — вытянутой форме, что согласуется с теорией (например, [15]).

### Заклучение

В работе рассматриваются мезомасштабные вихри Капской котловины различной полярности, которые в течение 7 дней изменяют свою форму, преобразовываясь в процессе эволюции в филаменты. На основе данных реанализа GLORYS12V1 установлено, что в процессе деформации вихрей баротропным потоком происходит изменение горизонтальных полуосей вихрей: большая полуось  $a$  максимально увеличивается, а малая  $b$  — значительно уменьшается. Вертикальный же размер вихрей остается неизменным. Вытянувшийся по горизонтали вихрь (филамент) хорошо наблюдается в поле относительной завихренности, так как в вытянутом ядре значения относительной завихренности максимальны по модулю. За 7 дней эволюции вихри

вытянулись так, что продольный масштаб в 4,5 раза превышает поперечный для антициклона и в 3,5 для циклона. Вытягиваясь в филаменты, вихри теряют энергию: максимальные значения всех видов энергии соответствуют круглой форме вихрей, а минимальные — вытянутой форме. Следовательно, при увеличении параметра вытянутости  $\epsilon$  происходит уменьшение энергии: за 7 дней вытягивания вихрей потенциальная энергия уменьшается в 3 раза для антициклона и в 1,5 — для циклона, а кинетическая энергия в среднем уменьшается в 1,3 раза. Также при деформации вихрей пропорционально частоте Вайсяля-Брента растет параметр вертикальной сплюснутости, что связано с усилением стратификации вод.

Таким образом, на примере двух вихрей в Капской котловине (циклона и антициклона) мы показали, что при изменении их формы путем вытягивания уменьшается кинетическая и доступная потенциальная энергия этих вихрей. Так как при вытягивании вихрей форма изменяется таким образом, что одна из осей эллипсоида в горизонтальном плане становится больше другой в несколько раз, то это означает переход энергии вихрей из мезомасштаба в субмезомасштаб. Однако энергия никуда не исчезает, и ее уменьшение в вихрях свидетельствует, что часть энергии перешла в течение. При перераспределении энергии из мезомасштаба в субмезомасштаб происходит прямой каскад, и наоборот: когда энергия от вихрей переходит к течениям — обратный каскад энергии (см. [16]).

### Список литературы

1. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1992. Vol. 97 (C5). P. 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
2. Biastoch A., Böning C. W., and Lutjeharms J. R. E. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2008. Vol. 456. P. 489—492. doi:10.1038/nature07426.
3. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31 (16). L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
4. Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., and Raj R. P. Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20. 6011. <https://doi.org/10.2205/2020ES000720>.
5. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in oceanography*. 2011. Vol. 91(2). P. 167—216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
6. Boebel O., Rossby T., Lutjeharms J. et al. Path and variability of the Agulhas Return Current // *Deep Sea Research*. 2003. Part II. Vol. 50. P. 35—56.
7. Lutjeharms J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current // *Ocean Science*. 2007. Vol. 3. P. 129—147.
8. Lutjeharms J. R. E. *The Agulhas Current*. Springer-Verlag, Berlin, 2006. 329 p.
9. Olson D. B., Evans R. H. Rings of the Agulhas current // *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*. 1986. Vol. 33(1). P. 27—42. doi:10.1016/0198-0149(86)90106-8.
10. Doglioli A. M., Veneziani M., Blanke B. et al. Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33. L14611.
11. Gordon A. L., Haxby W. F. Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990. Vol. 5(C3), P. 3117—3125. doi:10.1029/JC095iC03p03117.
12. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018. Vol. 139. P. 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.

13. Малышева А. А., Колдунов А. В., Белоненко Т. В., Сандалюк Н. В. Вихри Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии // Ученые записки РГГМУ. 2018. №52. С. 154—170.
14. Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508 (2). С. 270—274.
15. Жмур В. В., Травкин В. С., Белоненко Т. В., Арутюнян Д. А. Трансформация кинетической и потенциальной энергии при вытягивании мезомасштабного вихря // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38(5). С. 466—480. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-466-480.
16. Жмур В. В. Мезомасштабные вихри океана. М.: ГЕОС, 2011. 289 с.
17. Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow // Journal of the Physical Society of Japan. 1981. Vol.50 (10). P. 35173520. doi:10.1143/JPSJ.50.3517.
18. Жмур В. В., Панкратов К. К. Динамика мезомасштабного вихревого образования в поле течения крупного интенсивного вихря // Океанология. 1990. Т.30 (2). С. 170—178.
19. Травкин В. С., Жмур В. В., Белоненко Т. В. Вклад мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины в ее энергетiku // Российский журнал наук о Земле. 2022. Т. 22. ES4002. doi:10.2205/2022ES000802.
20. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A.V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. ES5003. doi:10.2205/2021ES000773.
21. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П. О вытягивании мезомасштабных вихрей в филаменты и распределении их на поверхности океана // Известия вузов. Радиофизика. 2023. Т. LXVI (2—3).
22. Haynes P., McIntyre M. On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces // J. Atmos. Sci. 1987. Vol. 44 (5). P. 828—841.
23. Haynes P., McIntyre M. On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity // J. Atmos. Sci. 1990. Vol. 47 (16). P. 2021—2031.

### *References*

1. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*. 1992; 97 (C5): 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
2. Biastoch A., Böning C. W., and Lutjeharms J. R. E. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*. 2008, (456): 489—492. doi:10.1038/nature07426.
3. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model. *Geophysical Research Letters*. 2004; 31:(16): L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
4. Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., and Raj R. P. Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020; (20): 6011. doi:10.2205/2020ES000720.
5. Chelton D. B., Schlax M. G., and Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*. 2011; 91(2): 167—216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
6. Boebel O., Rossby T., Lutjeharms J. et al. Path and variability of the Agulhas Return Current. *Deep Sea Research*. Part II. 2003; (50): 35—56.
7. Lutjeharms J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current. *Ocean Science*. 2007; (3): 129—147.
8. Lutjeharms J. R. E. The Agulhas Current. Springer-Verlag, Berlin, 2006: 329 p.
9. Olson D.B., Evans R. H. Rings of the Agulhas current. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*. 1986; 33(1): 27—42. doi:10.1016/0198-0149(86)90106-8.
10. Doglioli A. M., Veneziani M., Blanke B. et al. Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model. *Geophysical Research Letters*. 2006; 33: L14611.
11. Gordon A. L., Haxby W. F. Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990; 5(C3): 3117—3125. doi:10.1029/JC095iC03p03117.

12. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018; (139): 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.
13. Malysheva A. A., Koldunov A. V., Belonenko T. V., Sandalyuk N. V. Agulhas leakage eddies based on satellite data. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2018; (52): (154—170). (In Russ.).
14. Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V., Suetin B. P. Direct and Inverse Energy Cascades in the Ocean during Vortex Elongation. *Doklady Earth Sciences. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences*, 2022; 507(3): (457—460). (In Russ.). doi: 10.1134/S1028334X22601675.
15. Zhmur V. V., Travkin V. S., Belonenko T. V., Arutyunyan D. A. Transformation of Kinetic and Potential Energy during Elongation of a Mesoscale Vortex. *Physical Oceanography*. 2022; 29(5): 449-462. doi:10.22449/1573-160X-2022-5-449-462.
16. Zhmur V. V. *Mezomasshtabnye vihri okeana = Mesoscale ocean eddies*. M.: GEOS, 2011: 289 p. (In Russ.).
17. Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1981; 50 (10): 3517-3520. doi:10.1143/JPSJ.50.3517.
18. Zhmur V. V., Pankratov K. K. Dynamics of mesoscale eddy formation in the flow field of a large intense eddy. *Okeanologiya = Oceanology*. 1990; 30 (2): (170—178). (In Russ.).
19. Travkin V. S., Zhmur V. V., Belonenko T. V. Contribution of mesoscale eddies of the Lofoten Basin to its energy. *Rossiiskij zhurnal nauk o Zemle = Russ. J. Earth. Sci.* 2022; 22: ES4002. doi:10.2205/2022ES000802. (In Russ.).
20. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021; 21: ES5003. doi:10.2205/2021ES000773.
21. Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V., Suetin B. P. On the stretching of mesoscale eddies into filaments and their distribution on the surface of the ocean. *Izvestiya vuzov. Radiofizika = News of universities. Radiophysics*. 2023; LXVI (2—3). doi: 10.52452/00213462\_2023\_66\_02\_104. (In Russ.).
22. Haynes P., McIntyre M. On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces. *J. Atmos. Sci.* 1987; 44 (5): 828—841.
23. Haynes P., McIntyre M. On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 1990; 47 (16): 2021—2031.

### **Информация об авторах**

*Мальшева Алина Анатольевна*, кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, инженер-исследователь, alinamalysheva97@mail.ru.

*Белonenko Татьяна Васильевна*, д-р геогр. наук, профессор кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, t.v.belonenko@spbu.ru.

### **Information about authors**

*Malysheva Alina Anatol'evna*, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, research engineer, alinamalysheva97@mail.ru.

*Belonenko Tatyana Vasil'evna*, Dr. Sci. (Geogr.), professor, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, t.v.belonenko@spbu.ru.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 08.07.2023*

*Принята к печати после доработки 22.10.2023*

*The article was received on 08.07.2023*

*The article was accepted after revision on 22.10.2023*