

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 478—493.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):478—493.

Научная статья
УДК 551.465.4:551.465.5 (267.2)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493

Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс

*Алина Анатольевна Малышева, Татьяна Васильевна Белоненко,
Диана Андреевна Яковлева*

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

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ кинематических и динамических характеристик мезомасштабных вихрей течения Агульяс. Основой исследования являются данные океанического реанализа GLORYS12v1. В работе анализируются два вихря разной полярности: их треки движения, термохалинные и общие характеристики. Антициклон является более устойчивым, чем циклон, распространяется почти прямолинейно на северо-запад и пересекает Южную Атлантику. В отличие от других исследований мы не выявляем уменьшения энергии вихрей в течение их жизни. Построены и исследованы вертикальные и горизонтальные разрезы относительной и потенциальной завихренности, а также частоты Вайсяля—Брента. На основе анализа средних параметров этих вихрей и термохалинных характеристик были оценены свойства рассматриваемых вихрей.

Ключевые слова: Агульяс, мезомасштабные вихри, GLORYS12v1, потенциальная завихренность, вихри Агульяс.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-27-00004.

Для цитирования: Малышева А. А., Белоненко Т. В., Яковлева Д. А. Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 478—493. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493.

Original article

Characteristics of two eddies of different polarity in the Agulhas Current

Alina A. Malysheva, Tat'iana V. Belonenko, Diana A. Iakovleva

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, alinamalysheva97@mail.ru

Summary. Agulhas eddies are the vortices generating in the southwest Indian Ocean. These eddies are the dominant structures that carry the warm tropical Indian Ocean water into the Atlantic. The article presents a comparative analysis of the kinematic and dynamic characteristics of the Agulhas eddies. The research is based on the oceanic reanalysis GLORYS12v1 data and the product «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH». The paper analyzes two eddies of different polarity: their tracks, thermo-

© Малышева А. А., Белоненко Т. В., Яковлева Д. А., 2022

haline and general characteristics. The anticyclone is shown to be the only long-lived eddy and to propagate almost rectilinearly to the northwest, crossing the South Atlantic. In contrast to other studies, we do not find a decrease in the energy of eddies over time, that is, there is no decrease in the values of speed and the radius of the eddies. Additionally, vertical and horizontal sections of relative and potential vorticity (PV) were built and studied by the Rossby and Ertel formulas, as well as the Brunt-Vaisala frequency. It is shown that there is practically no stratification in the center of the anticyclone, which contributes to small values of Ertel's PV, large values of the Brunt—Vaisala frequency contributing to large values of Ertel's PV in the center of the cyclone. Minimum (negative) values of Rossby's potential vorticity are observed in the anticyclone core, the maximum values being located in the cyclone core. Based on the analysis of the average parameters of these eddies and thermohaline characteristics, the properties of the considered eddies were estimated.

Keywords: Agulhas, mesoscale eddies, GLORYS12v1, potential vorticity, Agulhas eddies.

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-27-00004.

For citation: Malysheva A. A., Belonenko T. V., Iakovleva D. A. Characteristics of two eddies of different polarity in the Agulhas Current. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):478—493. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493.

Введение

Мезомасштабные вихри играют заметную роль в переносе тепла, массы, биохимических характеристик и кинетической энергии. Области вихревой активности приурочены к районам крупномасштабных течений по причине наличия здесь бароклинной и баротропной неустойчивости, что является условием образования мезомасштабных вихрей. Одним из таких течений и является течение Агульяс.

Течение Агульяс — главный источник теплой и соленой воды, переносимой из Индийского океана в Атлантику. К югу от африканского побережья в районе 30—45° ю.ш., 10—35° в.д. оно совершает резкий разворот на восток, образуя петлю (разворот Агульяс) диаметром 340 км. В англоязычных источниках это явление получило название «Agulhas Retroflexion» [1, 2]. Течение является быстрым и мощным и периодически образует отдельные вихри, состоящие из теплых и соленых вод Индийского океана. Часть образованных вихрей способна преодолевать значительные расстояния, в основном на запад через Атлантический океан [3—5]. Этот поток теплых и соленых вод, переносимых из Индийского океана в Атлантический, играет значительную роль в циркуляции океанических вод Южного полушария и оказывает влияние на Атлантическую меридиональную термохалинную циркуляцию, которая, в свою очередь, является одним из главных регуляторов климата. Таким образом, вихри Агульяс опосредованно влияют на климатические изменения [6].

«Agulhas Retroflexion» периодически формирует отдельные антициклонические ринги (кольца), которые состоят из теплых и соленых вод Индийского океана. Температура в них выше на 5 °С, и соленость выше на 0,3 psu, чем температура и соленость окружающих вод равной плотности [7]. Перемещаясь со средней скоростью 12 см/с, ринги быстро распадаются, образуя вихри меньших масштабов (мезомасштабные вихри), которые сохраняют характерные свойства как минимум до 5° в.д. в западном направлении и до 46° ю.ш. в южном направлении [1].

Как правило, ринги Агульяс не являются долгоживущими и при разрушении образуют вихри, которые имеют меньшие масштабы [4]. Установлено, что донная топография существенно влияет на генерацию и распространение вихрей в данном регионе [8]. Подводный рельеф, в особенности хребты, соединяющие Африканский континент со Срединно-океаническим хребтом в Южной Атлантике, влияет на распространение вихрей таким образом, что здесь они теряют почти 70 % кинетической энергии, при этом могут разделяться на множество вихрей меньшего диаметра, большинство из которых никогда не покидает район Капской Котловины [9].

Вихри Агульяс исследовались как по альтиметрическим данным, так и с использованием различных гидродинамических моделей [9, 10]. В работе Сандалук и Белоненко [11] анализируются два основных района повышенного вихреобразования: район «Agulhas Retroflexion» и район, включающий плато Агульяс. Авторы проанализировали характеристики 2225 вихрей (1143 циклонических и 1082 антициклонических), выделенных за период 1993—2015 гг. Показано, что средняя продолжительность жизни мезомасштабных вихрей в данном регионе составила 275 дней, среднее пройденное расстояние — 657 км. Средняя продолжительность жизни антициклонических вихрей составила 140 дней, что существенно выше, чем у циклонических (110 дней). В среднем антициклонические вихри преодолели большую дистанцию, чем циклонические (682 км у антициклонических и 632 км у циклонических). Наибольшая продолжительность жизни, 1827 дней, наблюдалась у антициклонического вихря. Средний радиус вихрей (масштаб) составил 82,7 км.

Целью данной работы является анализ вертикальной структуры и оценка потенциальной завихренности двух долгоживущих вихрей — циклона и антициклона, образованных течением Агульяс. Сравнительный анализ кинематических и динамических характеристик двух разнополярных вихрей позволит получить адекватное представление о структуре и динамических параметрах мезомасштабной вихревой динамики акватории.

Данные

Океанический реанализ GLORYS12v1

Использовались данные океанического реанализа GLORYS12v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), которые доступны на сайте Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Продукт содержит ассимилированные натурные, спутниковые и in-situ данные. Массив включает в себя среднесуточные и среднемесячные данные по скорости течений, температуре и солёности воды, а также аномалии уровня. Данные имеют пространственное разрешение $1/12^\circ$ и 50 уровней глубины. Период наблюдения: с 1993 г. по настоящее время. Использование этого массива репрезентативно благодаря наличию регулярных контактных измерений (более 5000 буев Argo за весь период наблюдений). Для расчетов использовались данные GLORYS12v1 за 13 декабря 2012 г.

Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH»

Использовались данные массива «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» (<http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/>) с 1993 г. по настоящее время. Массив содержит мезомасштабные вихри, выделенные методом автоматической идентификации и трекинга. Для определения вихрей применялся специально разработанный алгоритм идентификации вихрей, основанный на анализе альтиметрических снимков. Более подробное описание данного алгоритма приводится в работе [12]. Алгоритм сохраняет только те вихри, срок существования которых больше 4 недель. Временная дискретность данных составляет 1 сутки. В наборе данных содержится следующий ряд параметров: координаты долготы и широты центра вихря, амплитуда, радиус, орбитальная скорость.

Результаты

Общие характеристики

Среди всех вихрей течения Агульяс для анализа нам были необходимы вихри, удовлетворяющие следующим условиям:

- образованные течением Агульяс;
- на протяжении всего цикла существования идентифицирующиеся по базе «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product»;
- имеющие различную полярность;
- расположенные на минимальном расстоянии друг от друга.

Нам удалось найти несколько пар циклонов и антициклонов Агульаса, которые удовлетворяют выбранным условиям в период с 1993 по 2022 г. Одна пара вихрей особенно привлекла наше внимание, так как антициклон оказался одним из самых долгоживущих вихрей Агульаса и просуществовал почти 3 года. Данная пара вихрей и была выбрана для дальнейшего анализа. Анализировались вертикальная структура и потенциальная завихренность циклона (C) и антициклона (AC). На момент встречи (13.12.2012) эти два вихря расположены к западу от африканского побережья на одной широте, C западнее AC , а вихри практически образуют диполь. На рис. 1 представлены аномалии уровня моря, где C характеризуется отрицательными аномалиями до $-0,4$ м, а AC — положительными, достигающими $0,6$ м в его центре. На период наблюдения и в момент встречи (13.12.2012) вихри уже покинули район формирования и начали перемещение в западном направлении.

На основе массива «Mesoscale Eddies...» сделана оценка средних параметров вихрей и их периодов жизни. Если долгоживущий AC существовал 1065 дней (с 30.10.2012 по 29.09.2015), то C имеет период жизни 123 дня (с 2.12.2012 по 3.04.2013). Видно, что период жизни AC на порядок превышает период жизни C . Причина того, что антициклоны являются более устойчивыми структурами по сравнению с циклонами, кроется в так называемой циклон-антициклонной асимметрии вихрей, которая следует из нелинейных свойств циклонов и антициклонов. У циклона ротор скорости параллелен вектору вертикальной компоненты вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен. Это приводит к тому,

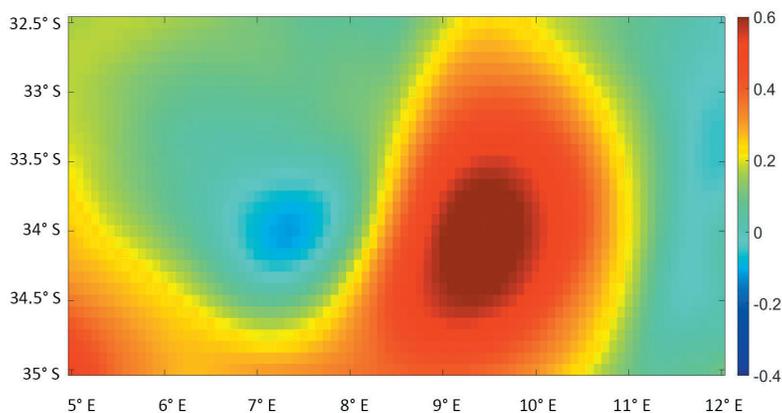


Рис. 1. Аномалии уровня моря (м) по данным GLORYS за 13.12.2012.

Fig. 1. Sea level anomalies (m) according to GLORYS data for 13.12.2012.

что только у антициклона скалярная нелинейность уравнивает дисперсию. У циклона же дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы [13]. Эта особенность, демонстрирующая циклон-антициклонную асимметрию вихрей, доказана как теоретически, так и экспериментально: антициклоны устойчивы и отличаются сравнительно большим временем жизни; циклоны сравнительно быстро распадаются (диспергируют). Эта особенность также характеризует вихри, представленные на рис. 1. Средние параметры вихрей, полученные по массиву «Mesoscale Eddies...», представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры циклонического (C) и антициклонического (AC) вихрей течения Агульяс
Parameters of cyclonic (C) and anticyclonic (AC) vortices of the Agulhas flow

Полярность вихря	Средний радиус вихря	Средняя амплитуда	Средняя орбитальная скорость	Путь	Время перемещения	Средняя скорость перемещения
	R , км	A , см	$V_{\text{ор}}$, см/с			
AC	74	5	79	4217	1065	5,8
C	72	6	107	438	123	5,7

Из табл. 1 видно, что средние значения орбитальной скорости существенно больше средних значений скорости перемещения вихрей. Такие вихри можно считать осесимметричными [14].

На рис. 2 показаны треки движения вихрей на основе массива «Mesoscale Eddies...».

Отметим, что при доминирующем перемещении вихрей в западном направлении наблюдается отклонение по меридиану, причем, AC отклоняется к экватору,

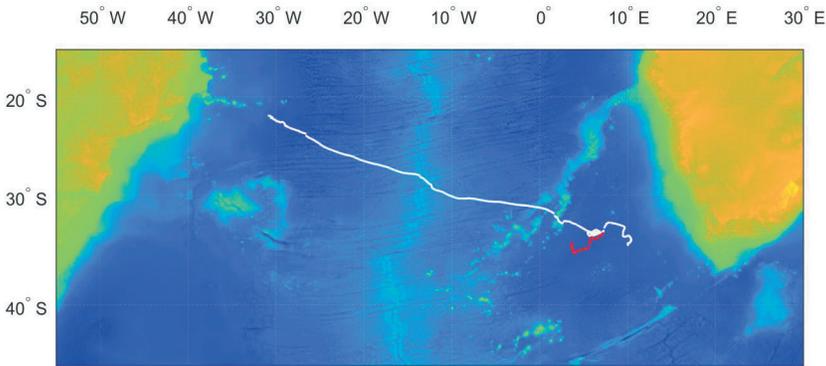


Рис. 2. Треки антициклона (белый цвет) и циклона (красный цвет) с моментов их генерации до диссипации.

Пересечение треков соответствует дате наблюдения 13.12.2012 (см. рис. 1).

Fig. 2. Tracks of an anticyclone (shown by white) and a cyclone (shown by red) from the moments of their generation to dissipation.

The intersection of the tracks corresponds to the observation date 12.13.2012 (see Fig. 1).

а C к полюсу. Теоретическое обоснование этого явления рассмотрено в работе [15]. На вихревой дрейф оказывают влияние крупные формы рельефа [16]. Хребты считаются серьезным препятствием для вихрей, вихри обычно снижают скорость движения или диссипируют при прохождении самых глубоких долин. Факт уменьшения энергии вихрей в процессе их эволюции описан Коротаяевым и Федотовым [17], а также в работе Резника [18]. Однако, как показано на рис. 3, для рассматриваемого антициклона данный факт не подтверждается, т. е. не происходит уменьшения скорости движения или радиуса вихря с течением времени. Очевидно, что на перемещение вихрей влияет множество внешних факторов, когда вихри периодически теряют или получают дополнительную энергию.

На рис. 3 *а* видно, что скорость перемещения AC изменяется от 3 до 10 см/с. Движение вихря не замедляется в процессе эволюции. Более того, к концу жизненного цикла вихря скорость перемещения достигает максимальных значений — 10 см/с, а затем уменьшается до 0,065 см/с, после чего вихрь диссипирует. Увеличение скоростей перемещения иногда коррелирует с увеличением радиуса вихря, однако эта зависимость наблюдается лишь в отдельные моменты времени. Очевидно, изменчивость параметров AC -вихря определяется сложным комплексом различных динамических условий — взаимодействием с фоновыми течениями, изменением термохалинной структуры среды, слиянием с другими вихрями, атмосферными воздействиями и т.д.

Для циклона C (рис. 3 *б*) также отмечается увеличение скорости перемещения перед диссипацией вихря. Скорость изменяется в диапазоне от 0,045 до 0,072 м/с. Однако радиус вихря к концу жизненного цикла постепенно уменьшается от 115 до 57 км.

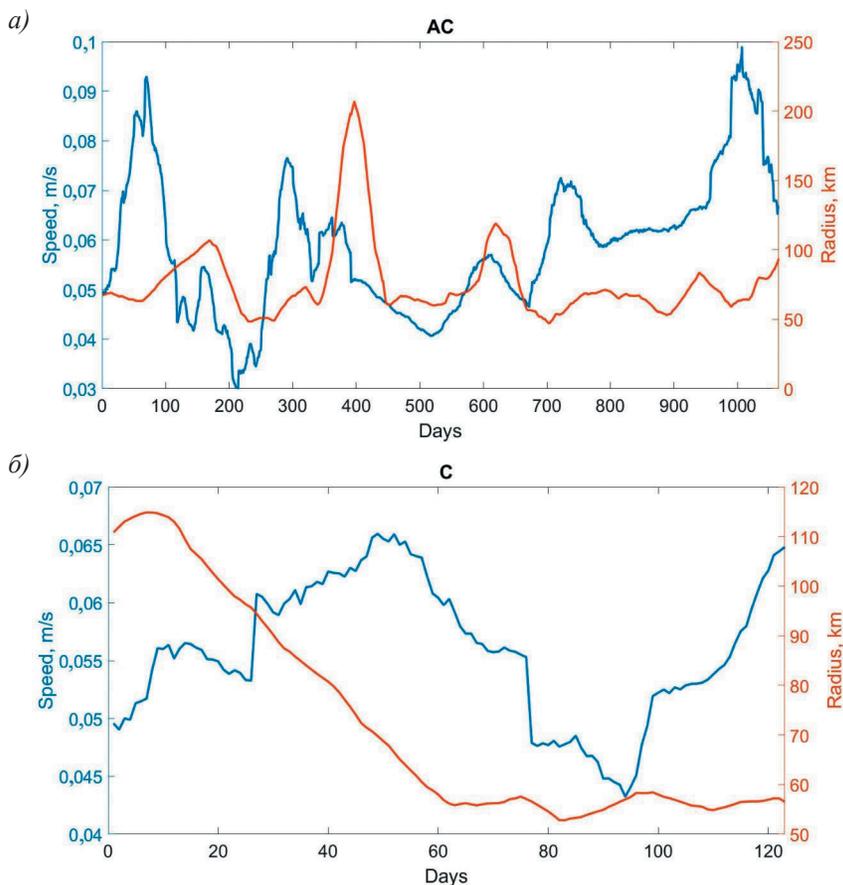


Рис. 3. Изменчивость во времени скорости перемещения (синим) и радиуса (красным) антициклона (а) и циклона (б).

Fig. 3. Time-variability of moving speed (blue) and radius (red) of the anticyclone (a) and cyclone (b).

Термохалинные характеристики вихрей

Аномалии термохалинных характеристик рассчитывались относительно среднегодовых значений в соответствующих точках (см. вертикальные разрезы по 33.5° ю.ш. на рис. 4).

На вертикальных разрезах температуры и солености (рис. 4) хорошо видны оба вихря. Центр циклона расположен на 7.5° в.д., а антициклона – на 9° в.д. Видно, что оба вихря являются подповерхностными. Аномалии изотерм и изохалин циклона простираются до 1000 м и примерно до 1200 м для антициклона. АС представляет из себя подповерхностный вихрь в форме полуэллипсоида с ядром до глубины 800 м с повышенными значениями температуры и солености.

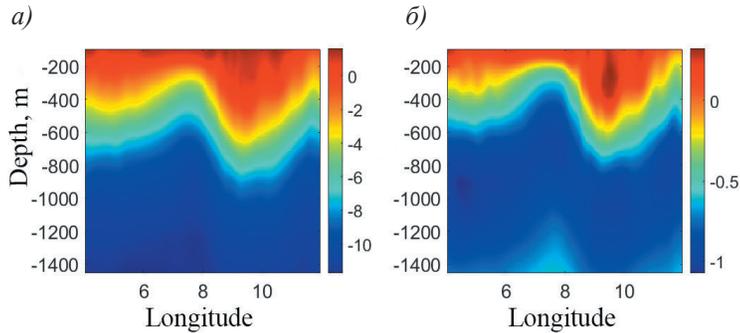


Рис. 4. Аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$) (а) и солёности (psu) (б) на разрезе 33.5° ю.ш. на 13.12.2012.

Fig. 4. Anomalies of temperature ($^{\circ}\text{C}$) (a) and salinity (psu) (b) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.

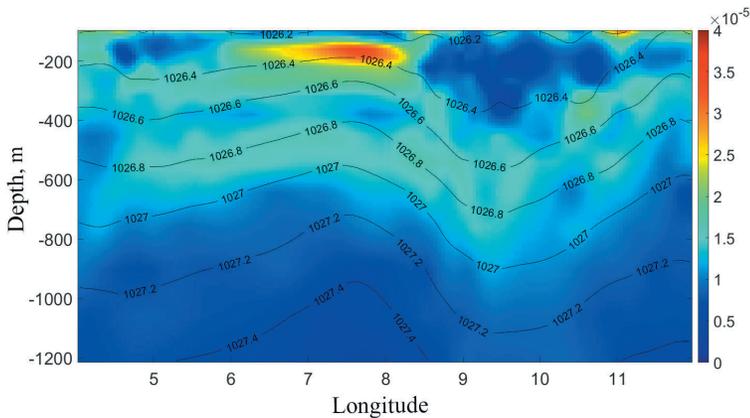


Рис. 5. Частота Вьяйсяля—Брента (с^{-1}) на разрезе 33.5° ю.ш. 13.12.2012. Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 5. Brunt—Vaisala frequency (s^{-1}) on the section 33.5° S. on 13.12.2012. The black lines show isopycnals.

Температура и солёность в ядре антициклона выше средних фоновых значений на 2°C и $0,3$ psu соответственно. Ядро циклона располагается на глубине около 200 м, температура и солёность в ядре циклона ниже фоновых значений на 1°C и $0,2$ psu соответственно.

Частота Вьяйсяля—Брента (ЧВБ) рассчитывалась с помощью термодинамического уравнения TEOS-10 [19], реализованного в среде Matlab. Ядра вихрей хорошо выделяются на вертикальном разрезе ЧВБ (рис. 5). Максимум ЧВБ наблюдается в области ядра С и составляет $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, в то время как в ядре АС стратификация

однородная. Ядро циклона с однородной стратификацией расположено примерно на горизонтах 100—200 м, а ядро антициклона на горизонтах 200—400 м. В то же время прогибы изопокин простираются, как минимум, до глубины 1200 м.

Относительная завихренность

Одним из основных параметров вихрей является относительная завихренность:

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

где u и v — зональная и меридиональная составляющая скорости течений. Используется правая ось координат, где ось x направлена на восток, ось y — на север, z — вертикальная ось.

Помимо циклона и антициклона, представленных на рис. 1, в поле относительной завихренности выделяются другие динамические структуры (рис. 6). Максимальные по модулю значения ζ ($4 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) расположены в восточной части C , в то время как в его северной части значения близки к нулю или даже отрицательны. Это означает, что завихренность является динамической характеристикой, в то время как аномалии уровня, представленные на рис. 1, кинематической. Помимо вихрей, в поле завихренности отображаются сдвиговые течения, которые также имеют положительную или отрицательную завихренность. Для AC максимальные отрицательные значения ζ ($-2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) расположены в центре и южной части вихря.

Число Россби $Ro = \left| \frac{\zeta}{f} \right|$ (f — параметр Кориолиса) изменяется в диапазоне от 0,03 до 0,05 и является довольно малым, что говорит о большой нелинейности

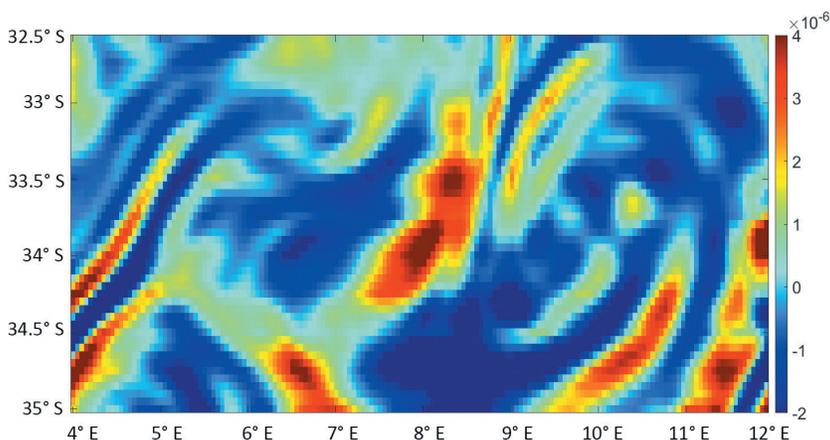


Рис. 6. Пространственное распределение относительной завихренности (c^{-1}) на поверхности на 13.12.2012.

Fig. 6. Spatial distribution of relative vorticity (s^{-1}) on the surface on 13.12.2012.

вихрей, что является одной из причин меридионального смещения при их перемещении на запад [15].

Потенциальная завихренность вихрей по формулам Эртеля и Россби

Основной динамической характеристикой вихрей является потенциальная завихренность (PV). Если бы система, в которой перемещаются вихри, была замкнутой, то выполнялся бы закон сохранения потенциальной завихренности этих вихрей. Этот закон является аналогом закона сохранения количества движения в механических процессах. Однако в реальном океане нельзя ожидать изолированности вихревых процессов от всех других, и, как следствие, система не является замкнутой, поэтому в процессе эволюции может меняться потенциальная завихренность вихрей наряду с изменениями их термохалинных и кинематических характеристик.

В работе представлены два основных подхода к расчету потенциальной завихренности вихрей: Эртеля и Россби.

Расчет потенциальной завихренности PV вихрей по формуле Эртеля

Потенциальная завихренность в подходе Эртеля рассчитывалась по формуле (12) из работы Жмур и др. [20]:

$$PV = \frac{\left(-\frac{\partial v}{\partial z}\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} - \left(-\frac{\partial u}{\partial z} + f_h\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды; $f_h = 2\omega \cos \varphi$ — меридиональная составляющая угловой скорости вращения Земли $2\Omega = (0, f_h, f)$; φ — широта. Так как вертикальные градиенты скоростей и также f_h незначительны, расчет потенциальной завихренности проводится по более простой формуле:

$$PV = \frac{(\zeta + f) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0}, \quad (2)$$

где ρ_0 — референтная плотность воды, принимая в расчетах $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$.

На вертикальном разрезе PV (рис. 7) хорошо выделяются ядра C и AC, окруженные изопикнами. В циклоне изопикны сжимаются, а в антициклоне — раздвигаются. Во всей исследуемой области $PV > 0$, однако в ядре AC имеет нулевые значения, чему способствует отсутствие стратификации. Минимальные значения ($0,6 \cdot 10^{-10}$ — $0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) расположены на периферии ядра AC, а максимальные ($1,8 \cdot 10^{-10}$ — $2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) — в области ядра циклона.

Расчет потенциальной завихренности σ вихрей по формуле Россби

Расчет σ в подходе Россби производился по формуле (13) из работы Жмур и др. [20]:

$$\sigma = \text{rot}_z \mathbf{V} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \nabla^2 \psi + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где ψ — функция тока; N — частота Вайсяля—Брента.

Потенциальная завихренность σ по формуле Россби (рис. 8) отличается размерностью от PV по формуле Эртеля. В отличие от оценок PV , значения σ в ядре антициклона отрицательны и достигают минимума $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. В циклоне значения σ положительны в ядре C и достигают максимума $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на горизонте 200 м. Сравнение рисунков 7 и 8 показывает, что ядро антициклона на графике потенциальной завихренности по Россби имеет большую вертикальную протяженность,

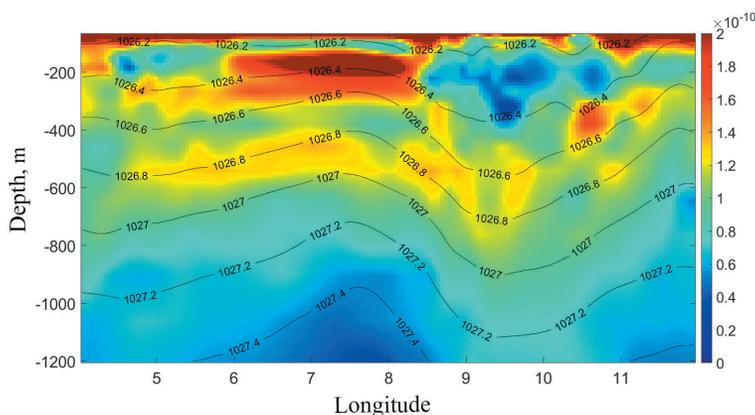


Рис. 7. Оценка PV по формуле Эртеля ($\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) для 13.12.2012 на разрезе по 33.5° ю.ш.
Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 7. Estimation of PV by the Ertel formula ($\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.
The black lines show isopycnals.

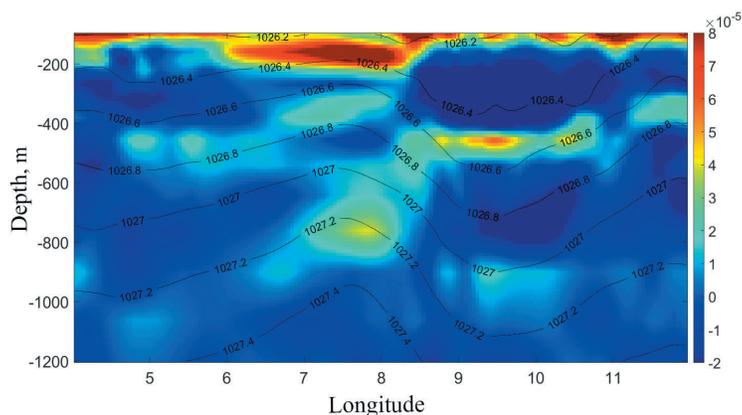


Рис. 8. Оценка PV по формуле Россби (с^{-1}) на 13.12.2012 на разрезе 33.5° ю.ш.
Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 8. Estimation of PV by the Rossby formula (s^{-1}) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.
The black lines show isopycnals.

чем по формуле Эртеля. Оно разделяется на две части незначительной областью с положительными значениями σ примерно на глубине 500 м, что обусловлено незначительным подъемом изопикн в этой части ядра. В слое ниже 500 и до 900 м значения PV снова отрицательны и достигают $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Ядро циклона с положительными значениями также разделяется на две части: слой до 200 м с положительными значениями. На рис. 8 видно, что области положительных и отрицательных значений σ распространяются на глубины, где расположен циклон.

Заключение

В работе изучены два вихря течения Агульяс с различной полярностью. Получены средние параметры этих вихрей, выявлены траектории их движения и построены вертикальные разрезы термохалинных характеристик. Показано, что вихри распространяются на запад, причем антициклон является более устойчивым и почти пересекает Атлантический океан в течение 1065 дней, в то время как циклон диссипирует через 123 суток после начала движения. Соответственно, антициклон прошел расстояние 4217 км, а циклон 438 км. Значения скоростей дрейфа различаются незначительно (5,8 и 5,7 см/с), как и радиусы (74 и 72 км). Средние по времени значения амплитуды у вихрей также различаются незначительно (5 и 6 см); на дату 13.12.2012 наибольшие значения амплитуды в вихрях достигают значений 11 см для AC и 5 см для C . В процессе движения вихрей не происходит ожидаемого уменьшения скорости движения вихря с течением времени; более того, скорость для AC увеличивается до максимума 10 см/с накануне диссипации, и до 6,5 см/с для C непосредственно перед диссипацией. В то же время, радиусы вихрей постепенно уменьшаются в процессе эволюции.

Проанализирована вертикальная структура вихрей. Показано, что для C аномалии изотерм и изохалин простираются до 1000 м, а для AC — до 1200 м. Ядро AC распространяется до глубины 800 м. Температура и соленость в ядре AC выше средних фоновых значений на $2 \text{ }^\circ\text{C}$ и 0,3 psu соответственно. Ядро C располагается на глубине около 200 м, температура и соленость в ядре циклона выше фоновых значений на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ и 0,2 psu соответственно.

Ядра вихрей отчетливо выделяются на разрезе ЧВБ. Ядро циклона, которому присуща однородная стратификация, характеризуется максимальными значениями ЧВБ ($4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), в отличие от ядра антициклона, в котором значения ЧВБ преимущественно равны нулю, следовательно, стратификация отсутствует.

Относительная завихренность также наглядно прослеживается в ядрах вихрей, максимальные положительные значения ($4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) наблюдаются в области циклона, максимальные отрицательные ($-2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) — в области антициклона.

Представлена оценка потенциальности завихренности на основе двух подходов: по формуле Эртеля и по формуле Россби. Показано, что в центре антициклона практически отсутствует стратификация, что способствует малым значениям потенциальной завихренности по Эртелю ($0,6 \cdot 10^{-10} - 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$). А в центре циклона большие значения частоты плавучести способствуют большим значениям

$PV(1,8 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$. Кроме того, в центре антициклона, где отрицательная относительная завихренность велика, PV близка к нулю. Минимальные (отрицательные) значения потенциальной завихренности по Россби достигают $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и наблюдаются в области ядра AC . Максимальные значения $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ расположены в области ядра C .

Потенциальная завихренность — центральное понятие гидродинамики и физической океанографии, характеризующее многие процессы динамики атмосферы и океана. Потенциальная завихренность всегда сохраняется для идеальных океанических движений, когда термобарический коэффициент (зависящий от изменений давления коэффициентов теплового расширения и халинного сжатия) предполагается равным нулю, как, например, для несжимаемой морской воды. Если проводить сравнение с механическими движениями, то можно сказать, что закон сохранения PV в океане является аналогом закона сохранения момента инерции в механике. Однако в действительности морская вода — это жидкость, компонентами которой являются вода и соль, и поэтому, вообще говоря, PV не сохраняется. Термобаричность морской воды, молекулярная вязкость, соленость и коэффициент диффузии всегда изменяют потенциальную завихренность жидкой частицы. Именно термобаричность и механизмы молекулярной диссипации изменяют потенциальную завихренность при использовании различных приближений, применяемых к динамическим уравнениям [20—22]. Все это означает, что оценки PV , получаемые по формулам Эртеля или Россби, отличаются друг от друга не только размерностью, но и распределением характеристик. Это два принципиально разных подхода к описанию одного и того же динамического свойства движения жидкости, которые представлены на рисунках 7 и 8.

Список источников

1. Lutjeharms J. R. E., van Ballegooyen R. C. The retroflection of the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. V. 18. P. 1570—1583.
2. Lutjeharms J. R. E., Valentine, H. R. Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. V. 18. P. 761—774.
3. 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. V. 97, No. C5. P. 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
4. 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. V. 31 (16). L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
5. Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Generation and evolution of Natal Pulses, solitary meanders in the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. V. 29 (12). P. 3043—3055.
6. Stocker T. F. Climate changes: from the past to the future — a review // *Int. J. Earth Sci.* 1999. V. 88. P. 365—374. doi: 10.1007/s005310050271.
7. Gordon A. L. Indian—Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflection // *Science*. 1985. V. 227. P. 1030—1033. doi: 10.1126/science.227.4690.1030.
8. Hall C., Lutjeharms J. R. E. Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // *Journal of Marine Systems*. 2011. V. 85. P. 1—10. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.10.003.

9. Schouten M. W., de Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105, No. C9. P. 21913—21925.
10. Doglioli A. M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C05043. doi: 10.1029/2006JC003952.
11. Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В. Мезомасштабная вихревая динамика в районе течения Агульяс по данным спутниковой альтиметрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 5. С. 179—190. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190.
12. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in oceanography*. 2011. V. 91, No. 2. P. 167—216. doi: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
13. Незлин М. В. Солитоны Россби // *Успехи физических наук*. 1986. Т. 150 (1). С. 1—58.
14. Коротаев Г. К. Структура и кинематика синоптических вихрей в океане: теория и современные наблюдения // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 6 (216). С. 757—780. doi: 10.22449/0233-7584-2020-6-757-780.
15. 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. V. 21. ES5003. doi: 10.2205/2021ES000773.
16. 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. V. 139. P. 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.
17. Korotaev G., Fedotov A. Dynamics of an isolated barotropic eddy on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. V. 264. P. 277—301. doi: 10.1017/S0022112094000662.
18. Reznik G. M., Dewar W. K. An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the β -plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. V. 69. P. 301—321. doi: 10.1017/S0022112094001576.
19. IOC, SCOR and IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO. 2010. 196 p.
20. Жмур В. В., Новоселова Е. В., Белоненко Т. В. Потенциальная завихренность в океане: подходы Эртеля и Россби с оценками для Лофотенского вихря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 6. С. 721—732. doi: 10.31857/S0002351521050151.
21. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1 // *Oceanology*. 2021. Vol. 61, No. 6. P. 830—838. doi: 10.1134/S0001437021060333.
22. Жмур В. В., Новоселова Е. В., Белоненко Т. В. Особенности формирования поля плотности в мезомасштабных вихрях Лофотенской котловины. Часть 2 // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 3. С. 341—356. doi: 10.31857/S0030157422030170.

References

1. Lutjeharms J. R. E., van Ballegooyen, R. C. The retroflection of the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1988;(18):1570—1583.
2. Lutjeharms J. R. E., Valentine, H.R. Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // *Journal of Physical Oceanography*. 1988;(18):761—774.
3. 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.
4. 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.
5. Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Generation and evolution of Natal Pulses, solitary meanders in the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1999;29(12):3043—3055.

6. Stocker T. F. Climate changes: from the past to the future — a review // *Int. J. Earth Sci.* 1999;(88):365—374. doi: 10.1007/s005310050271.
7. Gordon A. L. Indian—Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflexion // *Science*. 1985;(227):1030—1033. doi: 10.1126/science.227.4690.1030.
8. Hall C., Lutjeharms J. R. E. Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // *Journal of Marine Systems*. 2011;(85):1—10. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.10.003.
9. Schouten M. W., de Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2000;105(C9):21913—21925.
10. Doglioli A. M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007;(112):C05043. doi: 10.1029/2006JC003952.
11. Sandalyuk N. V., Belonenko T. V. Mesoscale eddy dynamics in the area of the Agulhas Current according to satellite altimetry data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;15(5):179—190. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190. (In Russ.).
12. Chelton D. B., Schlax M. G., 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.
13. Nezlin M. V. Rossby solitons. *Uspekhi fizicheskikh nauk = successes of physical sciences*. 1986;150(1):1—58. (In Russ.).
14. Korotaev G. K. Structure and kinematics of synoptic eddies in the ocean: theory and modern observations. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal = Marine hydrophysical journal*. 2020;36(6,216):757—780. doi: 10.22449/0233-7584-2020-6-757-780. (In Russ.).
15. 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.
16. 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.
17. Korotaev G., Fedotov A. Dynamics of an isolated barotropic eddy on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;(264): 277—301. doi: 10.1017/S0022112094000662.
18. Reznik G. M., Dewar W. K. An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the β -plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;(69): 301—321. doi: 10.1017/S0022112094001576.
19. IOC, SCOR and IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO. 2010. 196 p.
20. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Potential vorticity in the ocean: Ertel and Rossby approaches with estimates for the Lofoten eddy. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = News RAN. Atmospheric and ocean physics*. 2021;57(6):721—732. doi: 10.1134/S0001433821050157. (In Russ.).
21. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1. *Oceanology*. 2021;61(6):830—838. doi: 10.1134/S0001437021060333.
22. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 2. *Okeanologiya = Oceanology*. 2021;62(3):289—302. doi: 10.1134/S0001437022030171. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Диана Андреевна Яковлева, инженер-исследователь, кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, d.iakovleva@spbu.ru.

Information about authors

Alina A. Malysheva, research engineer, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, alinamalysheva97@mail.ru.

Tatiana V. Belonenko, Dr. Sci. (Geogr.), professor, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, t.v.belonenko@spbu.ru.

Diana A. Iakovleva, research engineer, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, d.iakovleva@spbu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.06.2022.

Принята к публикации 27.07.2022.

The article was received on 24.06.2022.

The article was accepted on 27.07.2022.