

## Исследование вихревой изменчивости в Лофотенской котловине на основе анализа доступной потенциальной и кинетической энергии

В. С. Травкин , Т. В. Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
 v.travkin@spbu.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020 г., после доработки – 08.12.2020 г.

*Цель.* Лофотенская котловина – одна из энергоактивных зон Мирового океана, характеризующаяся высокой активностью мезомасштабных вихрей. Целью работы является анализ различных составляющих общей энергии в этой котловине: средней кинетической и вихревой кинетической энергии, рассчитанных с использованием интеграла по объему доступной потенциальной и кинетической энергии Лофотенского вихря, – а также изменчивости этих характеристик. *Методы и результаты.* Используются данные реанализа *GLORYS12V1* за 2010–2018 гг. Анализируются средняя и вихревая кинетическая энергия, а для Лофотенского вихря – объемные доступная потенциальная и кинетическая энергия. Отмечается увеличение мезомасштабной активности вихрей в зимний период по сравнению с летним. Изучена эволюция доступной потенциальной и кинетической энергии Лофотенского вихря до горизонта 1000 м. Показано, что доступная потенциальная энергия вихря на порядок превышает кинетическую энергию, причем демонстрирует положительный тренд с коэффициентом  $0,23 \cdot 10^{15}$  Дж/год. Установлено, что наибольший вклад в потенциальную энергию вносит промежуточный слой от 600 до 900 м, а в кинетическую – слой от 0 до 400 м. Проанализированы скорости преобразования средней кинетической энергии в вихревую кинетическую энергию и скорости преобразования средней доступной потенциальной энергии в вихревую доступную потенциальную энергию (баротропная и бароклиническая неустойчивости). Показано, что первый тип преобразования доминирует летом, в то время как для второго характерно усиление потоков в зимний период.

*Выводы.* В вертикальных профилях проявляется увеличение кинетической энергии вихрей в зимний период по сравнению с летним. Доступная потенциальная энергия вихря на порядок превышает кинетическую энергию. Увеличение доступной потенциальной энергии подтверждается значимым положительным трендом и уменьшением вихревого числа Бюргера. Графики скорости преобразования баротропной неустойчивости отражают в зоне вихря разнонаправленные потоки, причем в зимний период наблюдается дипольная структура, в летний – трипольная. Наибольшая интенсивность баротропной неустойчивости отмечается летом. Для бароклинической неустойчивости характерно усиление потоков в зимний период, что связано с ослаблением стратификации в этот период вследствие зимней конвекции.

**Ключевые слова:** Лофотенская котловина, Норвежское море, доступная потенциальная энергия, кинетическая энергия, мезомасштабные вихри, Лофотенский вихрь

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 75295423 и гранта РФФИ № 20-05-00066.

**Для цитирования:** Травкин В. С., Белоненко Т. В. Исследование вихревой изменчивости в Лофотенской котловине на основе анализа доступной потенциальной и кинетической энергии // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 318–332. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-318-332

# Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on the Energy Analysis

V. S. Travkin ✉, T. V. Belonenko

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

✉ v.travkin@spbu.ru

**Purpose.** The Lofoten Basin is one of the most energetic zones of the World Ocean characterized by high activity of mesoscale eddies. The study is aimed at analyzing different components of general energy in the basin, namely the mean kinetic and vortex kinetic energy calculated using the integral of the volume of available potential and kinetic energy of the Lofoten Vortex, as well as variability of these characteristics.

**Methods and Results.** GLORYS12V1 reanalysis data for the period 2010–2018 were used. The mean kinetic energy and the eddy kinetic one were analyzed; and as for the Lofoten Vortex, its volume available potential and kinetic energy were studied. The mesoscale activity of eddies in winter is higher than in summer. Evolution of the available potential energy and kinetic energy of the Lofoten Vortex up to the 1000 m horizon was studied. It is shown that the vortex available potential energy exceeds the kinetic one by an order of magnitude, and there is a positive trend with the coefficient  $0,23 \cdot 10^{15}$  J/year. It was found that in the Lofoten Basin, the intermediate layer from 600 to 900 m made the largest contribution to the potential energy, whereas the 0–400 m layer – to kinetic energy. The conversion rates of the mean kinetic energy into the vortex kinetic one and the mean available potential energy into the vortex available potential one (barotropic and baroclinic instability) were analyzed. It is shown that the first type of transformation dominates in summer, while the second one is characterized by its increase in winter.

**Conclusions.** The vertical profile shows that the kinetic energy of eddies in winter is higher than in summer. The available potential energy of a vortex is by an order of magnitude greater than the kinetic energy. An increase in the available potential energy is confirmed by a significant positive trend and by a decrease in the vortex Burger number. The graphs of the barotropic instability conversion rate demonstrate the multidirectional flows in the vortex zone with the dipole structure observed in a winter period, and the tripole one – in summer. The barotropic instability highest intensity is observed in summer. The baroclinic instability is characterized by intensification of the regime in winter that is associated with weakening of stratification in this period owing to winter convection.

**Keywords:** Lofoten Basin, Norwegian Sea, available potential energy, kinetic energy, mesoscale eddies, Lofoten Vortex

**Acknowledgements:** the work was carried out at the financial support of the SPBU grant No. 75295423 and the RFBR grant No. 20-05-00066.

**For citation:** Travkin, V.S. and Belonenko, T.V., 2021. Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on the Energy Analysis. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 294-308. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-294-308

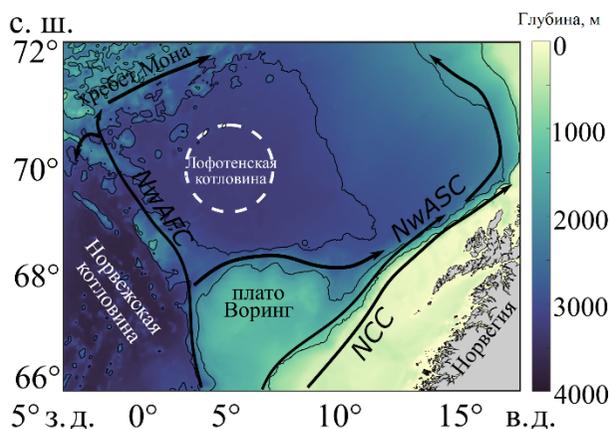
## 1. Введение

Общеизвестно, что изменение климата приводит к перестройке всей гидродинамической системы океан – атмосфера и проявляется, среди прочего, усилением ветров и увеличением мезомасштабной вихревой активности океана. Наибольшие изменения происходят в динамически активных регионах.

Лофотенскую котловину (ЛК), расположенную в центральной части Норвежского моря, по праву называют *hot spot* Северной Атлантики. ЛК характеризуется локальными максимумами дисперсии уровня океана и кинетической энергии мезомасштабных вихрей [1–3]. Баротропная и бароклинная неустойчивости Норвежского течения генерируют множество мезомасштабных вих-

рей, которые, оторвавшись от струи течения, перемещаются по акватории котловины. ЛК является не только районом повышенной мезомасштабной динамики, но и транзитным регионом, через который поступают теплые и соленые атлантические воды в Северный Ледовитый океан.

ЛК – топографически обособленное образование, так как она ограничена хребтом Мона на северо-западе и континентальным склоном и плато Воринг на юге и востоке (рис. 1). Котловина окружена ветвями Норвежского течения: Норвежским Склоновым течением (*The Norwegian Atlantic Slope Current*, сокр. *NwASC*) в восточной ее части, Норвежским Прибрежным течением (*the Norwegian Coastal Current*, сокр. *NCC*), распространяющимся вдоль скандинавского континентального склона, и Норвежским Фронтальным течением (*the Norwegian Atlantic Front Current*, сокр. *NwAFC*) на западе [1].



**Р и с. 1.** Район исследования. Белым кругом отмечено местоположение антициклонического Лофотенского вихря ( $r = 80$  км). Стрелками обозначены основные течения: *NwASC*, *NCC*, *NwAFC*

**F i g. 1.** Area under study. The white circle denotes the location of the anticyclonic Lofoten Vortex ( $r = 80$  km). Arrows indicate the main currents: *NwASC*, *NCC*, *NwAFC*

ЛК характеризуется интенсивными потерями тепла в зимний период ( $\sim 80$  Вт/м<sup>2</sup>) [4, 5] и значительными глубинами верхнего квазиоднородного слоя (0–1000 м) в периоды глубокой конвекции [6]. Заглубление изостерических поверхностей вследствие топографических особенностей котловины и вихревая адвекция способствуют продолжительному нахождению атлантических вод в ЛК, превращая ее в огромный тепловой резервуар, имеющий важное значение для термодинамических процессов Арктического бассейна [7].

В центре котловины находится квазипостоянный антициклонический Лофотенский вихрь, подпитываемый мезомасштабными антициклонами, отрывающимися от Норвежского течения [8–13]. Для ядра Лофотенского вихря характерны экстремальные величины относительной завихренности, приблизительно равные  $-0,5 f$ , но иногда достигающие  $-0,9 f$  ( $f = 1,37 \cdot 10^{-4}$  – параметр Кориолиса на  $70^\circ$  с. ш.), близкие к предельным теоретическим значениям  $f$  для антициклонов [10]. Орбитальные скорости достигают  $0,7$ – $0,8$  м·с<sup>-1</sup> [10, 14].

В настоящей работе анализируется вихревая доступная потенциальная и кинетическая энергия Лофотенской котловины. Энергия в Мировом океане в основном представлена средней кинетической энергией (*Mean Kinetic Energy*, сокр. *MKE*), вихревой кинетической энергией (*Eddy Kinetic Energy*, сокр. *EKE*), средней доступной потенциальной энергией (*Mean available Potential Energy*, сокр. *MPE*) и вихревой доступной потенциальной энергией (*eddy Available Potential Energy*, сокр. *APE*). Согласно работе [15], *APE* представляет собой разность между общей потенциальной энергией жидкости в настоящий момент и такой потенциальной энергией жидкости той же массы, которая могла бы существовать в аналогичном бассейне после перехода в стабильное эталонное состояние, когда изостерическая и изобарическая поверхности находятся на одном уровне. Другими словами, *APE* – это та часть потенциальной энергии системы, которая может быть преобразована в кинетическую в результате обратимых адиабатических процессов.

Общая кинетическая энергия обычно делится на *MKE* и *EKE*. *EKE* обычно используется для анализа временной и пространственной мезомасштабной изменчивости океана [16, 17].

В ЛК, как и во всем Мировом океане, одни типы энергии переходят в другие. Так, работа силы плавучести является источником *APE* крупномасштабной циркуляции. *APE* способна генерировать мезомасштабные вихри и, соответственно, увеличивать вихревую составляющую кинетической энергии [18]. В результате в динамически активных районах, а также в районах крупномасштабных течений переходные процессы доминируют, при этом *EKE* на порядок превосходит *MKE* [18, 19].

Анализируя связь между вихревой активностью и изопикническими градиентами, авторы работы [20] показали, что мезомасштабные вихри генерируются неустойчивостью в пограничных течениях и фронтальных зонах Норвежского моря. Авторы работы [10] по данным натуральных измерений установили, что в ядре Лофотенского вихря значения *APE* и *EKE* равны  $3,4 \cdot 10^{14}$  Дж и  $5,9 \cdot 10^{14}$  Дж соответственно. При этом среднее вихревое число Бюргера  $Bi_E$  [21] составляет  $1,75 \pm 0,01$ . Отметим, что данные значения в 10–20 раз превышают оценки, полученные ранее для Лофотенского вихря [22], а также для другого мезомасштабного вихря – антициклона в Северной Атлантике [23]. Стоит отметить, что значения *EKE* и *APE* ниже горизонта 1500 м почти не увеличиваются, что связано с незначительными градиентами плотностной стратификации и небольшими скоростями [14].

**Целью** данной работы является анализ различных составляющих общей энергии в ЛК: средней кинетической и вихревой кинетической энергии, рассчитанных с использованием интеграла по объему доступной потенциальной и кинетической энергии Лофотенского вихря, – а также изменчивости этих характеристик. Мы анализируем конверсию (перераспределение) энергии между составляющими в период максимального развития глубокой зимней конвекции (январь – март) и сравниваем полученные оценки с аналогичными оценками для летнего периода (июнь – август). Более глубокое понимание этих процессов позволит улучшить представления о мезомасштабной динамике котловины и роли энергии в регенерации квазипостоянного Лофотенского вихря.

## 2. Данные

В работе использовались ежедневные данные о температуре, солёности,  $u$ - и  $v$ -компонентах скоростей, полученные из реанализа *GLORYS12V1* за 2010–2018 гг. Данные доступны на портале *CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)*. Продукт *GLORYS12V1* – это вихреразрешающий реанализ Мирового океана с пространственным разрешением  $1/12^\circ$  на 50 горизонтах. Основой реанализа является модель *NEMO* с форсингом *ECMWF ERA-Interim*. В данных *GLORYS12V1* совместно ассимилируются данные спутниковой альтиметрии, температура поверхности моря, концентрация морского льда и вертикальные профили температуры и солёности *in situ*. Наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана. Временная дискретность данных 1 сут.

## 3. Методы

Для расчета *MKE* и *EKE*, приходящихся на единицу площади для единицы массы, применялись следующие формулы [2, 24]:

$$\begin{aligned} MKE &= 0,5 \left( \bar{u}^2 + \bar{v}^2 \right), \\ EKE &= 0,5 \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  – осредненные по времени компоненты скорости;  $u'$  и  $v'$  – аномалии компонент скорости, рассчитанные для каждой точки сетки и в дальнейшем осредненные по времени:

$$\begin{aligned} u' &= u - \bar{u}, \\ v' &= v - \bar{v}. \end{aligned}$$

Период осреднения 2010–2018 гг.

Для области Лофотенского вихря, ограниченной радиусом  $R = 80$  км (белый круг на рис. 1), можно рассчитать объёмные значения доступной потенциальной энергии ( $APE_V$ ) и вихревой кинетической энергии ( $KE$ ) (под объёмными значениями мы понимаем значения, рассчитанные с использованием интеграла по объёму) по следующим формулам [23, 25]:

$$\begin{aligned} APE_V &= \pi \int_0^R \int_{-H}^0 gz [\rho_{ref}(z) - \rho(r, z)] r dr dz, \\ KE &= 0,5 \pi \int_0^R \int_{-H}^0 \rho(r, z) U(r, z)^2 r dr dz, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $H$  – максимальная глубина (в расчетах принята равной 1000 м);  $\rho_{ref}$  – средний профиль потенциальной плотности вне области вихря ( $r > 80$  км). Формулы (2) записаны в предположении радиальной симметричности вихря. Вихревое число Бюргера рассчитывалось по формуле [21, 23]

$$Bu_E = KE / APE_V.$$

Известно, что поток возмущений может извлекать энергию из среднего потока через неустойчивости [26]. Для изучения вклада различных источников

в вихревую энергию вводятся показатели скорости преобразования энергии: *BC* и *BT*. *BC* характеризует скорость преобразования *MPE* в *APE*, которая является одним из источников мезомасштабных вихрей, в то время как *BT* характеризует скорость преобразования *MKE* в *EKE*. Другими словами, *BT* – это коэффициент баротропного преобразования, который, если он положителен, трансформирует энергию средних горизонтальных сдвигов и передает ее вихревому полю; *BC* – коэффициент бароклинного преобразования, который, если он положителен, перераспределяет энергию из поля *MPE* (т. е. горизонтальных градиентов плотности) в вихревое поле. Таким образом, источником *EKE* является бароклинная неустойчивость потоков (*BC*), при которой генерация *EKE* происходит за счет *MPE* ( $MPE \rightarrow APE \rightarrow EKE$ ) и баротропной неустойчивости (*BT*), формирующейся за счет *MKE*:  $MKE \rightarrow EKE$  [27].

Для расчетов нами использовались следующие формулы [27–29]:

$$BC = -\frac{g^2}{N^2\rho_0} \left( \overline{u' \rho'} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \overline{v' \rho'} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} \right),$$

$$BT = -\rho_0 \left[ \overline{u'^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{v'^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \overline{u'v'} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right],$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_0$  – фоновая плотность морской воды;  $N$  – частота плавучести.

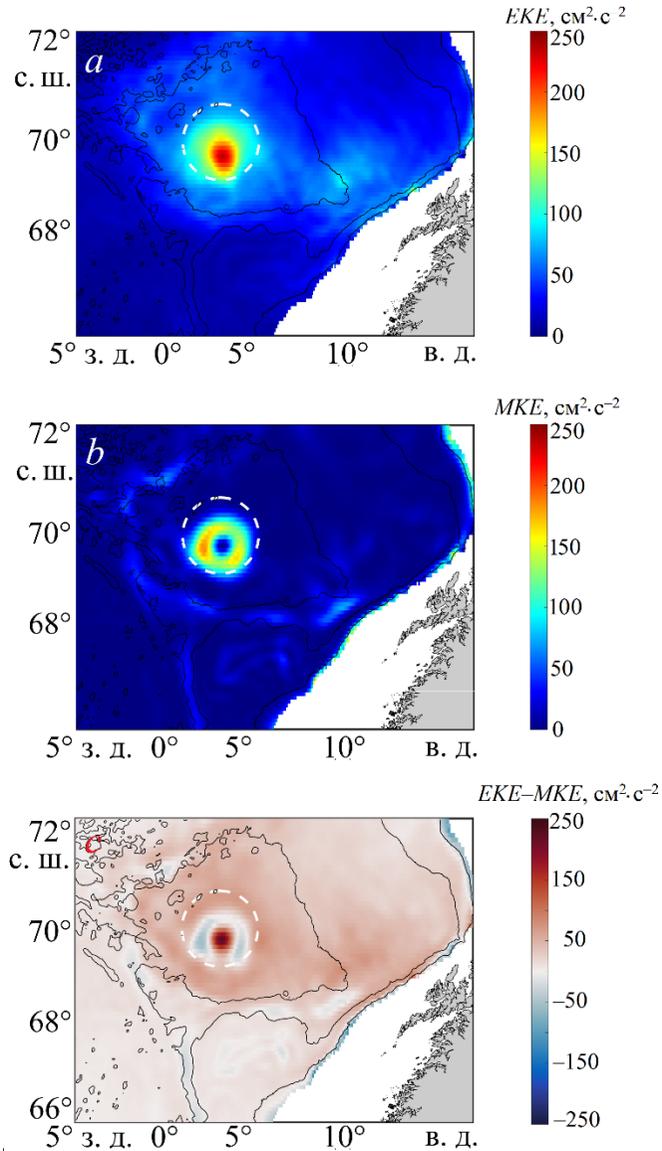
#### 4. Результаты

Рассмотрим пространственное распределение кинетической энергии в котловине (рис. 2). Энергия рассчитана по формулам (1). На рис. 2, *a* видно, что максимальные значения *EKE* наблюдаются в районе месторасположения ядра Лофотенского вихря (до  $250 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ ). Кроме того, отмечаются максимумы кинетической энергии (до  $100\text{--}130 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ ) в северо-западной и восточной частях ЛК и на континентальном склоне Норвегии. Для остальной части акватории значения *EKE* не превышают  $50 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ .

Для *MKE*, по сравнению с *EKE*, характерны меньшие значения (рис. 2, *b*). Хотя максимальные значения *MKE* также зафиксированы в районе Лофотенского вихря, они уступают соответствующим значениям *EKE*. Обратим внимание: если максимумы *EKE* (рис. 2, *a*) соответствуют центральной части Лофотенского вихря (центр расположен примерно на  $69,8^\circ$  с. ш.,  $4,8^\circ$  в. д.), то в распределении *MKE* (рис. 2, *b*) эта область соответствует минимальным значениям, близким к нулю, а повышенные значения *MKE* расположены на периферии вихря. Еще одна особенность – следование топографии увеличенных значений *MKE*: на рис. 2, *b* видно, что вытянутые области увеличенных значений расположены вдоль изобат. Очевидно, такая зависимость повторяет особенности расположения основных струй Норвежского Склонового и Норвежского Фронтального течений (см. рис. 1).

Разность между *EKE* и *MKE* положительна на большей части ЛК, при этом наибольшие значения зафиксированы в ядре Лофотенского вихря, а также

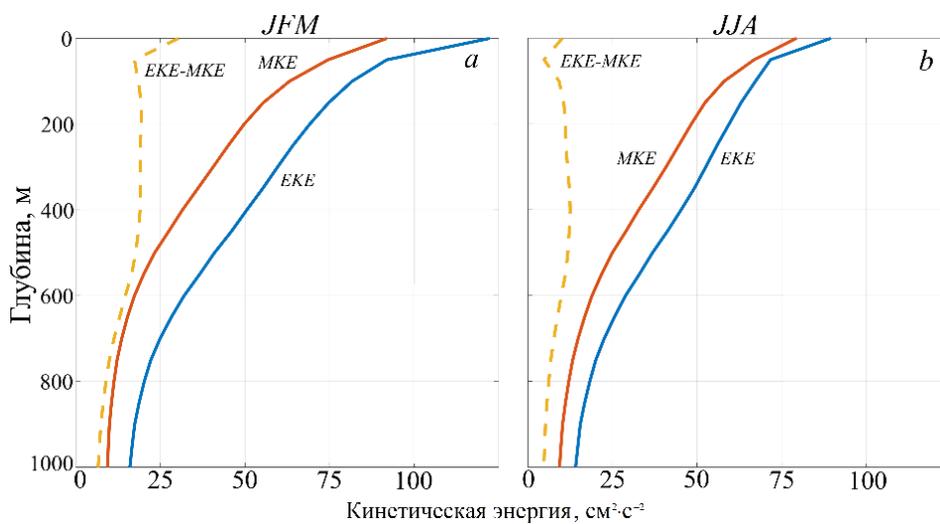
в центральной и восточных частях котловины (рис. 2, *c*). В то время как на периферии Лофотенского вихря, для которой характерны высокие значения МКЕ, разность отрицательна, в районе плато Воринг и в западной части ЛК она близка к нулю (см. также [30]).



**Рис. 2.** Пространственное распределение на горизонте 500 м: *a* –  $EKE$ ; *b* –  $MKE$ ; *c* – разность  $EKE$  и  $MKE$ . Осреднение за период 2010–2018 гг. Черными линиями показаны изобаты 1000, 2000 и 3000 м

**Fig. 2.** Spatial distribution at the 500 m horizon: *a* –  $EKE$ ; *b* –  $MKE$ ; *c* – difference between  $EKE$  and  $MKE$ . Averaging is for the period 2010–2018. Black lines show the 1000, 2000 and 3000 m isobaths

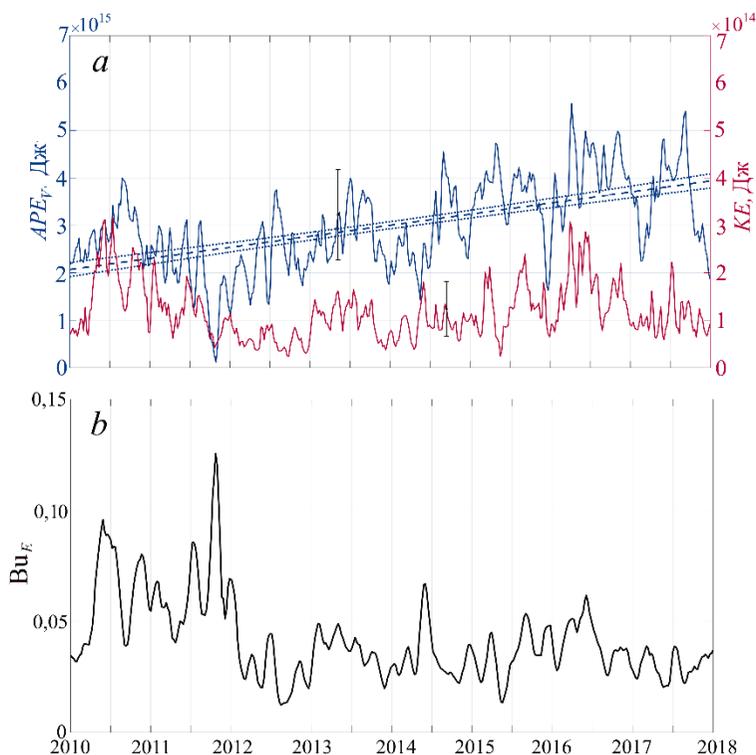
Вертикальное распределение этих характеристик показано на рис. 3. Значения осреднялись отдельно для зимнего и летнего периодов: январь – март (рис. 3, *a*) и июнь – август (рис. 3, *b*). Установлено, что на всех глубинах до 1000 м *EKE* доминирует. Наиболее ярко эта особенность отмечается в промежуточном слое от 100 до 500 м, где разность наибольшая. Отмечается также сезонная изменчивость, приводящая к усилению кинетической энергии в зимний период по сравнению с летним.



**Р и с. 3.** Вертикальные профили многолетних значений *EKE* (синяя линия), *MKE* (красная линия) и их разности (*EKE – MKE*) (желтая линия): *a* – январь – март (*JFM*); *b* – июнь – август (*JJA*)  
**F i g. 3.** Vertical profiles of the long-term values of *EKE* (blue line), *MKE* (red line) and their differences (*EKE – MKE*) (yellow line): *a* – January – March (*JFM*); *b* – June – August (*JJA*)

Эволюция объемных значений доступной потенциальной энергии и кинетической энергии для Лофотенского вихря представлена на рис. 4, *a*, а эволюция числа Бюргера – на рис. 4, *b*. Видно, что эволюция  $AP E_V$  сопровождается положительным значимым трендом, в то время как для *KE* эта тенденция отсутствует. Увеличение значений  $AP E_V$ , возможно, обусловлено заглублением изостерических поверхностей в ЛК в связи с происходящими климатическими процессами в Северной Атлантике (см. [7]).

Полученные оценки  $AP E_V$  и *KE* в целом довольно сходны со значениями, представленными в более ранних исследованиях [22, 23]. Так, для Лофотенского вихря характерно преобладание  $AP E_V$  (от  $0,1 \cdot 10^{15}$  до  $5,5 \cdot 10^{15}$  Дж) над *KE* (от  $0,2 \cdot 10^{14}$  до  $3,0 \cdot 10^{14}$  Дж) (рис. 4, *a*), что приводит к значениям  $Bu_E$ , равным  $\sim 0,02$ – $0,13$  (рис. 4, *b*). Кроме того, для  $AP E_V$  зафиксирован значимый положительный тренд, равный  $0,23 \cdot 10^{15}$  Дж/год (рис. 4, *a*), который отражается в уменьшении вихревого числа Бюргера (рис. 4, *b*).



**Р и с. 4.** Временной ход  $APE_V$  (синяя кривая) и  $KE$  (красная кривая) и линейный тренд  $APE_V$  (синяя штриховая линия) с доверительными интервалами (синие пунктирные линии) (*a*); эволюция вихревого числа Бюргера (*b*)

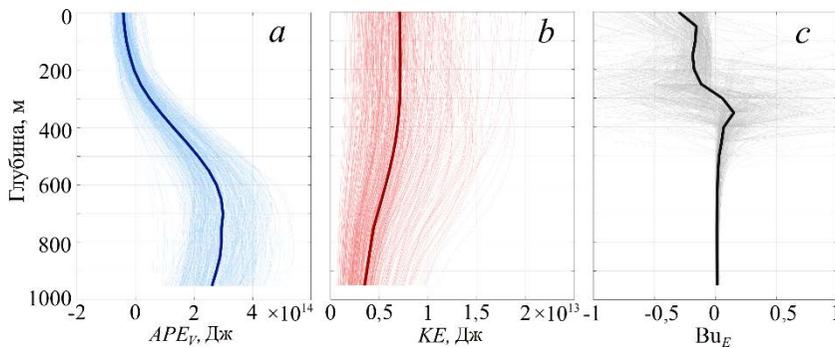
**F i g. 4.** Time variation of  $APE_V$  (blue line) and  $KE$  (red line), and linear trend of  $APE_V$  (blue dotted line) with the confidence intervals (blue dotted lines) (*a*); evolution of the vortex Burger number (*b*)

На рис. 5 представлены вертикальные профили  $APE_V$ ,  $KE$  и  $Bu_E$ , построенные с недельным осреднением (тонкие линии), а также осредненные за 2010–2018 гг. значения (толстые линии). Видно, что  $APE_V$  на глубинах от 0 до 400 м имеет и отрицательные значения (рис. 5, *a*). Это свидетельствует о том, что в Лофотенском вихре более плотные водные массы по сравнению с окружающими водами в области вне вихря (рис. 5, *a*). Наиболее быстрое изменение  $APE_V$  фиксируется на промежуточных глубинах 200–800 м. Так, максимальное среднее значение зафиксировано на горизонте 700 м, что демонстрирует наличие здесь наибольших плотностных градиентов, обусловленных смещением изопикн. Максимальные значения  $APE_V$  наблюдаются в промежуточном слое от 600 до 900 м.

На вертикальных профилях  $KE$  значения положительны и характеризуются постепенным уменьшением значений с глубиной (рис. 5, *b*). Наибольшие отдельные максимальные значения также фиксируются в поверхностном слое до глубины 300 м. В дальнейшем на глубине от 400 м до 750 м происходит уменьшение  $KE$  на отдельных профилях и ее средних значений.

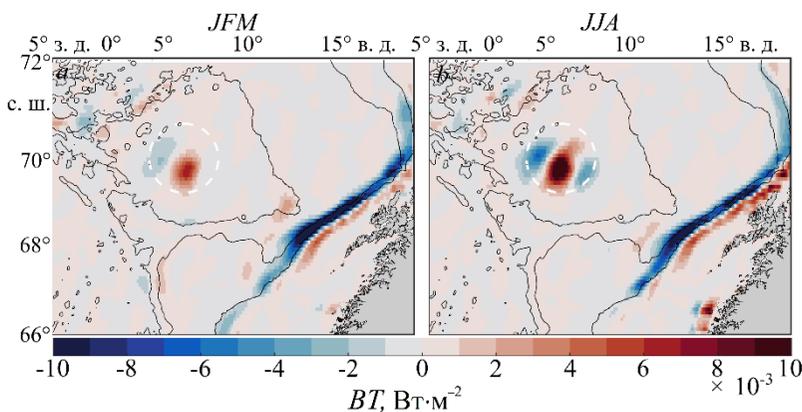
На рис. 5, *c* показана вертикальная изменчивость числа Бюргера  $Bu_E$ , рассчитанная для отдельных профилей и в осреднении. Видно, что экстремальные

значения для отдельных профилей (превышающие 1,75 по модулю) зафиксированы в верхнем слое моря от поверхности до 500 м. Максимальные градиенты  $Bu_E$  характерны для ядра Лофотенского вихря (300–400 м).



**Р и с. 5.** Вертикальные профили (тонкие линии)  $APE_V$  (a),  $KE$  (b), вихревого числа Бюргера  $Bu_E$  (c) в Лофотенском вихре. Среднее значение каждой величины показано толстой линией  
**Fig. 5.** Vertical profiles (thin lines) of  $APE_V$  (a),  $KE$  (b) and the vortex Burger number  $Bu_E$  (c) in the Lofoten Vortex. The average of each value is shown by a thick line

Наибольший интерес представляют графики преобразования энергии  $BT$  и  $BC$ , которые характеризуют конверсию между различными составляющими общей энергии. На рис. 6 показана скорость преобразования  $MKE$  в  $EKE$ . Положительные значения свидетельствуют о переходе средней кинетической энергии в вихревую, а отрицательные показывают поток энергии в обратном направлении. Видно, что наиболее энергоактивными зонами преобразования по-прежнему являются область Лофотенского вихря и стрежень Норвежского Склонового течения.



**Р и с. 6.** Пространственное распределение  $BT$  (преобразование  $MKE$  в  $EKE$ ), интегрированное в верхнем 500-метровом слое моря за период: a – январь – март ( $JFM$ ); b – июнь – август ( $JJA$ ). Черными линиями показаны изобаты 1000, 2000 и 3000 м

**Fig. 6.** Spatial distribution of  $BT$  (conversion of  $MKE$  into  $EKE$ ) integrated in the upper 500 m sea layer for the periods: a – January – March ( $JFM$ ); b – June – August ( $JJA$ ). Black lines show the 1000, 2000 and 3000 m isobaths

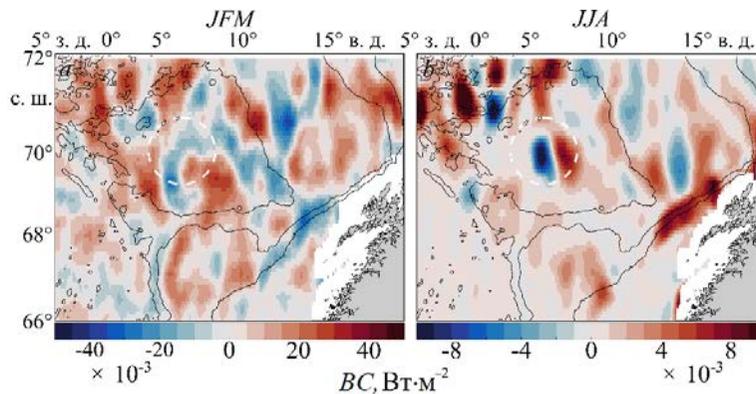
Отметим, что в районе расположения Лофотенского вихря наблюдаются разнонаправленные потоки в различных участках вихря. Чередование красной и синей областей в зоне расположения Лофотенского вихря демонстрирует активный возврат вихревой кинетической энергии в среднее поле, и наоборот. В зимний период в северо-западной части вихря отмечается область отрицательных значений (синий цвет), а с противоположной стороны – положительных (красный цвет).

Для ядра Лофотенского вихря характерны положительные значения *МКЕ* и поток энергии от ее среднего поля в *ЕКЕ*. Очевидно, указанный факт характеризует устойчивость вихря и его постоянное пребывание в этом районе.

В летний период наблюдаются две области отрицательных значений, расположенные в северо-западной и юго-восточной периферии вихря, где происходит трансформация *ЕКЕ* в *МКЕ*. В работе [31] анализируется подобное чередование областей положительных и отрицательных вертикальных скоростей в Лофотенском вихре. Авторы связывают эту особенность с влиянием Норвежского Склонового течения, распространяющимся в акватории вихря на северо-запад. Возможно, симметричное расположение областей разнонаправленных потоков энергии также обусловлено влиянием течения. Отметим также, что в летний период преобразование энергии происходит более интенсивно, чем в зимние месяцы.

Еще одна энергоактивная область на рис. 6 – это область Норвежского Склонового течения, где также происходит перераспределение энергии из одной формы в другую. Область, в которой расположен стрежень Норвежского Склонового течения, характеризуется отрицательными значениями *ВТ* в его западной периферии и положительными в восточной. Подробный анализ данного феномена представлен в работе [32].

Отдельные локальные экстремумы *ВТ* наблюдаются также в районах плато Воринг и северо-западной части котловины, однако их значения существенно меньше.



**Р и с. 7.** Пространственное распределение *BC* (преобразование *MPE* в *APE*), интегрированное в верхнем 500-метровом слое моря за период: *a* – январь – март (*JFM*); *b* – июнь – август (*JJA*). Черными линиями показаны изобаты 1000, 2000 и 3000 м

**F i g. 7.** Spatial distribution of *BC* (conversion of *MPE* into *APE*) integrated in the upper 500 m sea layer for the periods: *a* – January – March (*JFM*); *b* – June – August (*JJA*). Black lines show the 1000, 2000 and 3000 m isobaths

На рис. 7 представлена скорость преобразования  $MPE$  в  $APE$ . Положительные значения  $BC$  свидетельствуют о конвертации  $MPE$  в  $APE$ , в то время как отрицательные указывают на преобразование  $APE$  в  $MPE$ . Заметим, что в зимний период значения  $BC$  превышают более чем в четыре раза соответствующие значения для летнего периода. Очевидно, это обусловлено в первую очередь слабой стратификацией верхних слоев и низкими значениями  $N^2$  в зимний период вследствие формирования мощного квазиоднородного слоя.

Наиболее активными зонами преобразования являются центральная и восточная части ЛК, а также континентальный склон Норвегии. Удивительно, что эти процессы в прилегающем районе Норвежской котловины выражены очень мало (рис. 7). Отметим, что в зимний период в акватории ЛК формируются области с преобладанием положительных значений  $BC$ , причем на континентальном склоне Норвегии формируется вытянутая вдоль изобат область отрицательных значений  $BC$ , в то время как в летний период чуть севернее происходит трансформация энергии в противоположном направлении с увеличением  $APE$ .

## 5. Выводы

На основе данных *GLORYS12V1* за 2010–2018 гг. анализировались средняя и вихревая кинетическая энергия, а также объемная доступная потенциальная и объемная кинетическая энергия квазипостоянного вихря. Впервые получены вертикальные профили объемных значений  $APE_v$  и  $KE$  в Лофотенском вихре. В работе представлены пространственные распределения, а также вертикальные профили рассматриваемых характеристик. Получены оценки вихревого числа Бюргера.

Показано, что ядро Лофотенского вихря характеризуется увеличенными (относительно средних значений) значениями вихревой кинетической энергии. Однако на периферии вихря, наоборот, доминируют средние значения кинетической энергии.

Вертикальные профили кинетической энергии показывают увеличение мезомасштабной активности вихрей в зимний период по сравнению с летним, при этом вихревая компонента по-прежнему доминирует.

Изучена эволюция доступной потенциальной и кинетической энергии Лофотенского вихря, рассчитанных в слое от поверхности до 1000 м. Показано, что доступная потенциальная энергия вихря на порядок превышает кинетическую энергию, причем демонстрирует положительный тренд. Увеличение доступной потенциальной энергии в течение 2010–2018 гг. подтверждается значимым трендом с коэффициентом  $0,23 \cdot 10^{15}$  Дж/год, что отражает заглужение изопикнических поверхностей, которое, в свою очередь, может быть связано с климатическими изменениями в Северной Атлантике. Увеличение значений доступной потенциальной энергии сопровождается уменьшением вихревого числа Бюргера.

На вертикальных профилях доступной потенциальной энергии Лофотенского вихря можно увидеть отрицательные значения в поверхностном слое до

глубины 300 м. Максимальные значения  $APE_v$  обнаружены на горизонте 700 м, тогда как наибольший вклад в потенциальную энергию вносит промежуточный слой от 600 до 900 м. Для  $KE$  характерно распределение максимальных значений в квазиоднородном слое от поверхности до 300 м, но в дальнейшем с увеличением глубины  $KE$  начинает медленно снижаться, ускоряя снижение после горизонта 750 м. Таким образом, наибольший вклад в кинетическую энергию в ЛК дает слой от 0 до 400 м.

Вертикальный профиль вихревого числа  $Vi_E$  демонстрирует неоднородность значений в слое от 0 до 400 м, вызванную отрицательными и близкими к нулю значениями  $APE_v$ , а также увеличением  $KE$  в поверхностном слое. Экстремальные значения Бюргера для отдельных профилей достигают 1,75.

Графики скорости преобразования  $BT$  (баротропная неустойчивость:  $MKE \rightarrow EKE$ ) свидетельствуют о наличии в зоне вихря разнонаправленных потоков. Отметим, что в зимний период наблюдается дипольная структура, в летний – трипольная, причем в зоне Лофотенского вихря эти потоки более интенсивные летом. Область, в которой расположен стрежень Норвежского Склонового течения, характеризуется отрицательными значениями  $BT$  на западе и положительными на востоке в оба сезона.

В противоположность  $BT$ , для  $BC$  (бароклинная неустойчивость:  $MPE \rightarrow APE$ ) характерно усиление потоков в зимний период, что связано с ослаблением стратификации в этот период вследствие зимней конвекции. В этот период в акватории ЛК формируются области с преобладанием положительных значений  $BC$ , причем на континентальном склоне Норвегии формируется вытянутая вдоль изобат область отрицательных значений  $BC$ , а в летний период чуть севернее происходит трансформация энергии в противоположном направлении. В зимний период бароклинная неустойчивость доминирует, значения  $BC$  в 2–3 раза превышают максимальные значения  $BT$ , причем зимой бароклинная неустойчивость наблюдается на всей акватории котловины, в то время как повышенные значения  $BT$  характерны только для области Лофотенского вихря и по величине они значительно уступают значениям  $BC$ . Однако в летний период баротропные потоки и значения  $BT$  превышают соответствующие значения  $BC$ .

Материалы и часть рисунков были опубликованы в сокращенном виде в презентации докладов на конференциях <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Травкин В. С., Белоненко Т. В. Кинетическая и потенциальная энергия вихрей Лофотенской котловины по спутниковым и натурным данным // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М. : ИКИ РАН, 2020. С. 182. doi:10.21046/18DZZconf-2020a ; Травкин В. С., Белоненко Т. В. Кинетическая и потенциальная энергия течений вод в акватории Лофотенской котловины // Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО). Москва. 18–24 апреля 2021 (в печати) ; Травкин В. С., Белоненко Т. В. Кинетическая и потенциальная энергия Лофотенской котловины на основе спутниковых данных // Труды IV Всероссийской конференции и выставки «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» / MGO 2020 имени Л. Н. Карлина. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2020. С. 350–352. URL: [http://mgo-spb.ru/f/sbornik\\_trudy\\_konferencii\\_2020.pdf](http://mgo-spb.ru/f/sbornik_trudy_konferencii_2020.pdf) (дата обращения: 30.04.2021).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 4. P. 738–743. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50126>
2. *Volkov D. L., Kubryakov A. A., Lumpkin R.* Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high-resolution ocean model // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 105. P. 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>
3. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря / Т. В. Белоненко [и др.] // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2014. № 2. С. 108–121.
4. *Isachsen P. E., LaCasce J. H., Pedlosky J.* Rossby wave instability and apparent phase speeds in large ocean basins // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. Vol. 37, iss. 5. P. 1177–1191. <https://doi.org/10.1175/JPO3054.1>
5. *Nilsen J. E., Falck E.* Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948–1999 // *Progress in Oceanography*. 2006. Vol. 70, iss. 1. P. 58–90. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.014>
6. *Федоров А. М., Башмачников И. Л., Белоненко Т. В.* Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев ARGO и гидродинамического моделирования // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2019. Т. 64, № 3. С. 491–511. doi:10.21638/spbu07.2019.308
7. *Новоселова Е. В., Белоненко Т. В.* Изопикническая адвекция в Лофотенской котловине Норвежского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 56–67. doi:10.7868/S2073667320030041
8. Analysis of mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry / V. A. Zinchenko [et al.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 46–54. doi:10.7868/S2073667319030067
9. Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten Basin from satellite altimetry / S. M. Gordeeva [et al.] // *Advances in Space Research*. 2020. (In press). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.043>
10. The Dissipation of Kinetic Energy in the Lofoten Basin Eddy / I. Fer [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. Vol. 48, iss. 6. P. 1299–1316. doi:10.1175/JPO-D-17-0244.1
11. О вертикальной компоненте скорости в Лофотенском мезомасштабном вихре Норвежского моря / Т. В. Белоненко [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 6. С. 728–737. doi:10.7868/S0003351517060071
12. *Travkin V. S., Belonenko T. V.* Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 19, no. 5. ES5004. doi:10.2205/2019ES000676
13. *Sandalyuk N. V., Bosse A., Belonenko T. V.* The 3-D structure of Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 10. e2020JC016331. doi:10.1029/2020JC016331
14. Dynamical controls on the longevity of a non-linear vortex: The case of the Lofoten Basin Eddy / A. Bosse [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. 13448. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49599-8>
15. *Reid R. O., Elliott B. A., Olson D. B.* Available potential energy: A clarification // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 1. P. 15–29. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0015:APEAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0015:APEAC>2.0.CO;2)
16. *White M. A., Heywood K. J.* Seasonal and interannual changes in the North Atlantic subpolar gyre from Geosat and TOPEX/POSEIDON altimetry // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C12. P. 24931–24941. doi:10.1029/95JC02123

17. *Kang D., Curchitser E. N.* On the evaluation of seasonal variability of the ocean kinetic energy // *Journal of Physical Oceanography*. 2017. Vol. 47, iss. 7. P. 1675–1683. doi:10.1175/JPO-D-17-0063.1
18. *Gill A. E., Green J. S. A., Simmons A. J.* Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1974. Vol. 21, iss. 7. P. 499–528. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90010-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90010-2)
19. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll / D. B. Chelton [et al.] // *Science*. 2011. Vol. 334, iss. 6054. P. 328–332. doi:10.1126/science.1208897
20. *Trodahl M., Isachsen P. E.* Topographic influence on baroclinic instability and the mesoscale eddy field in the Northern North Atlantic Ocean and the Nordic Seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. Vol. 48, iss. 11. P. 2593–2607. doi:10.1175/JPO-D-17-0220.1
21. *D'Asaro E. A.* Observations of small eddies in the Beaufort Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1988. Vol. 93, iss. C6. P. 6669–6684. <https://doi.org/10.1029/JC093iC06p06669>
22. *Spoiland H., Chafik L., Rossby T.* On the long-term stability of the Lofoten Basin Eddy // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 4438–4449. <https://doi.org/10.1002/2016JC011726>
23. Breaking of internal waves and turbulent dissipation in an anticyclonic mode water eddy / B. Fernandez-Castro [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2020. Vol. 50, iss. 7. P. 1893–1914. doi:10.1175/JPO-D-19-0168.1
24. Kinetic energy of eddy-like features from sea surface altimetry / J. Martínez-Moreno [et al.] // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11, iss. 10. P. 3090–3105. <https://doi.org/10.1029/2019MS001769>
25. *Hebert D.* The available potential energy of an isolated feature // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1988. Vol. 93, iss. C1. P. 556–564. <https://doi.org/10.1029/JC093iC01p00556>
26. *Pedlosky J.* *Geophysical Fluid Dynamics*. New York : Springer, 1987. 710 p. doi:10.1007/978-1-4612-4650-3
27. Characteristics of subsurface mesoscale eddies in the northwestern tropical Pacific Ocean from an eddy-resolving model / A. Xu [et al.] // *Journal of Oceanology and Limnology*. 2020. Vol. 38, no. 5. P. 1421–1434. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-9313-4>
28. *Eden C., Böning C.* Sources of Eddy Kinetic Energy in the Labrador Sea // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, iss. 12. P. 3346–3363. doi:10.1175/1520-0485(2002)032<3346:SOEKEI>2.0.CO;2
29. The eddy kinetic energy budget in the Red Sea / P. Zhan [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 4732–4747. doi:10.1002/2015JC011589
30. *Fedorov A. M., Belonenko T. V.* Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20, no. 2. ES2002. doi:10.2205/2020ES000694
31. *Koldunov A. V., Belonenko T. V.* Hydrodynamic Modeling of Vertical Velocities in the Lofoten Vortex // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Vol. 56, no. 5. P. 502–511. <https://doi.org/10.1134/S0001433820040040>
32. Interaction between mesoscale eddies and the gyre circulation in the Lofoten Basin / R. P. Raj [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 7. e2020JC016102. <https://doi.org/10.1029/2020JC016102>

*Об авторах:*

**Травкин Владимир Станиславович**, инженер-исследователь, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9), v.travkin@spbu.ru

**Белоненко Татьяна Васильевна**, профессор, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4608-7781**, **WoS ResearcherID: K-2162-2013**, **Scopus Author ID: 6507005889**, t.v.belonenko@spbu.ru