

ВКЛАД МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ В ЕЕ ЭНЕРГЕТИКУ

В. С. Травкин^{*,1}, В. В. Жмур² и Т. В. Белоненко¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Получено 9 апреля 2022 г.; принято 30 июня 2022 г.; опубликовано 17 июля 2022 г.

Проводится сравнительная оценка вклада вихрей и других динамических структур в общую энергетику Лофотенской котловины. Основой исследования являются данные океанического реанализа GLORYS12V1 за 1993–2019 гг. Для области, ограниченной изобатой 3000 м, оценивается общая кинетическая и потенциальная энергия, а также соответствующий вклад в нее вихревой энергии. Для анализа применяется метод автоматической идентификации вихрей, позволяющий в выделенных областях получить оценки вихревой кинетической и потенциальной энергии. Установлено, что потенциальная энергия, как циклонов, так и антициклонов, в среднем в 2–3 раза превышает значения кинетической энергии, при этом для антициклонов значения энергии доминируют относительно энергии циклонов. Рассматривается межгодовая изменчивость и сезонный ход вихревой кинетической и потенциальной энергии. Сезонный ход выявил повышение обоих типов энергии в зимние месяцы. Установлено, что вклад вихрей в общую энергетику котловины невелик. Доля кинетической энергии вихрей составляет 7,3%, потенциальной энергии – 8,4%. Это означает, что основной вклад в энергетику котловины дают не мезомасштабные вихри, а другие динамические структуры – филаменты и фоновое течение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Лофотенская котловина, мезомасштабные вихри, кинетическая и потенциальная энергия, филаменты, метод идентификации, GLORYS12V1

Цитирование: Травкин, В. С., В. В. Жмур и Т. В. Белоненко, (2022), Вклад мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины в ее энергетику, *Российский журнал наук о Земле*, т. 22, ES4002, 10.2205/2022ES000802.

ВВЕДЕНИЕ

Лофотенская котловина (ЛК), расположенная в центральной части Норвежского моря [рис. 1](#), является энергоактивной зоной Мирового океана, играющей важную транспортную роль, связывая теплые и соленые воды атлантического происхождения с Арктическим бассейном [[Raj и др., 2020](#)]. Атлантический океан является единственным океанским бассейном на планете, где тепло переносится из Южного Полушария на север, вплоть до Северного Ледовитого океана. ЛК, расположенная на пути следования на север теплых и соленых атлантических вод, является основным тепловым резервуаром субарктических морей [[Volkov и др., 2013](#)].

ЛК с северо-запада и запада ограничена хребтами Мона и Ян-Майен, с юга плато Воринг, а с востока континентальным склоном Норвегии. Будучи топографически обособленным районом, ЛК формирует благоприятные условия для генерации мезомасштабных вихрей [[Belonenko и др., 2021](#)]. Мезомасштабные вихри извлекают из ветвей Нор-

вежского течения часть теплой и соленой Атлантической воды и перераспределяют её по всей котловине. За счет повышенной вихревой активности, ЛК является одним из самых динамически активных транзитных регионов Мирового океана, который характеризуется локальными максимумами дисперсии уровня океана и кинетической энергии вихрей [[Volkov и др., 2013](#)].

По данным работы [[Травкин и Белоненко, 2021](#)] установлено, что максимальные значения кинетической энергии наблюдаются в районе месторасположения квазипостоянного антициклонического Лофотенского вихря (ЛВ). ЛВ представлен внутритропической линзой, характеризующейся высокими значениями относительной завихренности до $-0,9f$ ($f = 1,37 \times 10^{-4}$ – параметр Кориолиса на 70° с.ш.) с радиусом ~ 32 – 39 км и орбитальными скоростями $\sim 0,7$ – $0,8$ м/с [[Raj и др., 2015](#); [Травкин и Белоненко, 2021](#)]. Заметное увеличение кинетической энергии также наблюдается в западной и восточной частях ЛК, о чем свидетельствует концентрация антициклонических мезомасштабных образований в данных районах [[Raj и др., 2015](#); [2016](#); [2020](#); [Травкин и](#)

*Контакт: vtravkin99@gmail.com

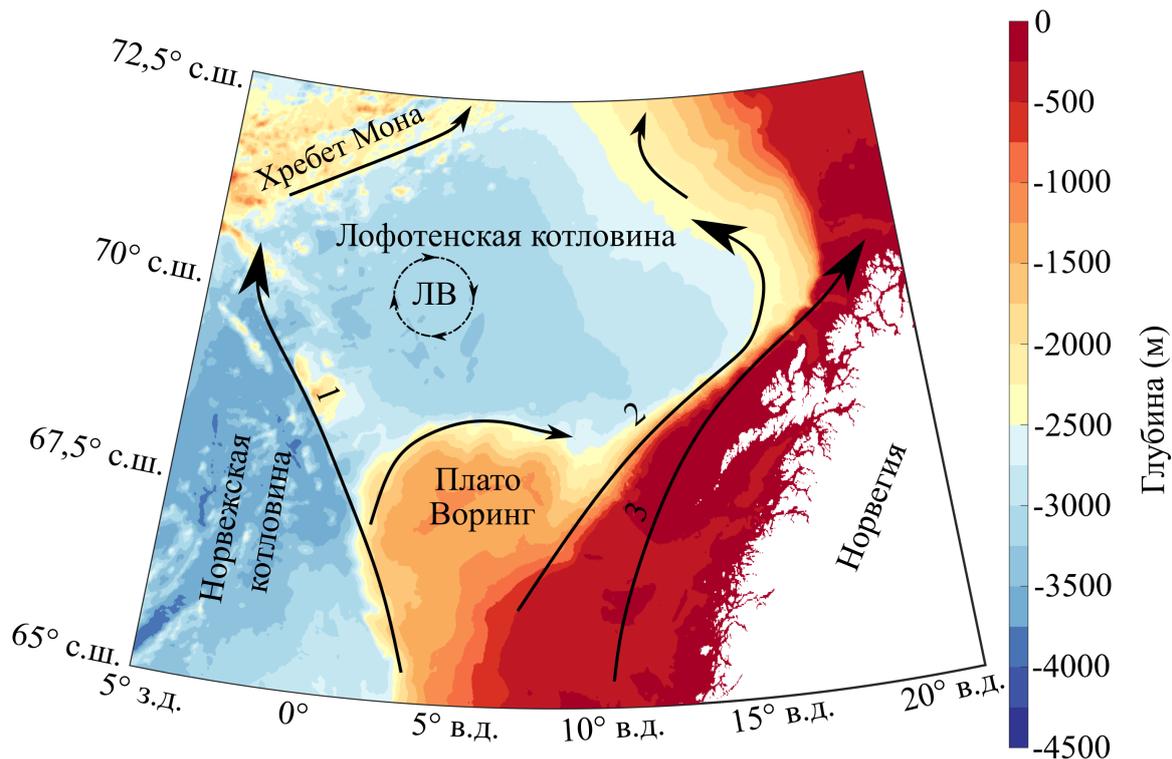


Рис. 1: Батиметрическая карта района исследования. Стрелками показаны направления основных течений: 1 – Норвежское фронтальное течение, 2 – Норвежское склоновое течение, 3 – Норвежское прибрежное течение. Положение антициклонического Лофотенского вихря (ЛВ) отмечено окружностью со стрелками.

Belonenko, 2019; Gordeeva u др., 2021]. Очевидно, что мезомасштабные вихри в ЛК играют значительную роль в энергетике котловины, однако численно этот вклад ранее никем не оценивался, как и не проводилось сравнение его с вкладом энергии других динамических структур, не относящихся к вихрям.

Целью данной работы является сравнительная оценка вклада вихрей и других динамических структур в общую энергетику Лофотенской котловины. Для достижения этой цели мы применили один из методов автоматической идентификации вихрей для каждого дня в период 1993–2019 гг. и оценили вихревую энергию, как для выделенных областей, так и всей акватории. Основные динамические структуры, влияющие на энергетику котловины, это мезомасштабные вихри, а также фоновые течения и филаменты.

ФИЛАМЕНТЫ И ФИЛАМЕНТАЦИЯ

Океанические филаменты (oceanic filaments) довольно часто встречаются на спутниковых изображениях температуры и цвета поверхности в областях, где возникают существенные поперечные

градиенты (например, вблизи течений, динамика которых определяется наличием береговой линии) [*McWilliams u др., 2009*]. Филаменты, как правило, имеют вытянутую форму, и они не выделяются методами автоматической идентификации, так как ошибка метода может быть весьма значительной. Продольный масштаб филаментов намного превосходит поперечный; для филаментов характерны большие значения относительной завихренности и доминирование сдвиговых составляющих. Форма филаментов способствует быстрому развитию неустойчивости и быстрой их диссипации. Филаменты имеют важное биологическое значение для прибрежных экосистем; некоторые авторы выделяют т.н. «прибрежные» и «апвеллинговые» филаменты (coastal and upwelling filaments) [*Artal u др., 2019*], представляющие собой длинные (~100–200 км) и довольно узкие (~10–50 км) нити.

Процесс формирования филаментов – филаментация – довольно хорошо изучен в двумерной и квантовой гидродинамике. Как правило, концентрации вещества, следуя за горизонтальным течением, сохраняются, а их изолинии в районах больших деформаций между мезомасштабными вихрями вытягиваются в филаменты. Такой

тип генерации пассивно-адвективных филаментов моделируется в моделях общей циркуляции океана с мезомасштабным разрешением сетки, однако при сокращении ширины филаментов до субмезомасштабного диапазона (100 м–10 км) их интенсификация приводит к большим значениям числа Ro и сильным агеострофическим ускорениям. Как правило, вихри способствуют наиболее неустойчивому режиму деформации филаментов, однако, в свою очередь, интенсивный филамент способен «обрезать» вихрь, особенно тогда, когда горизонтальный сдвиг, индуцируемый филаментом, имеет завихренность противоположного знака.

Генерация филаментов в неоднородном потоке вихря Кирхгофа, представляющего собой равновихренную эллиптическую область, рассматривалась в работе С. Кида [Kida, 1981]. Один из теоретических выводов этой работы состоит в том, что в определенных условиях под действием неоднородных течений такой вихрь вытягивается в вихревую нить, при этом оставаясь эллиптическим. Однако в этом случае образовавшийся филамент довольно быстро уничтожается течением, поскольку не индуцирует скоростей и, даже в условиях очень слабой диффузии, быстро распадается [Жмур, 2011].

Еще одним механизмом образования филаментов является процесс слияния вихрей. Установлено, что в процессе слияния большого и малого вихрей одинаковой полярности малый вихрь способен вытягиваться в вихревую нить и наматываться на большой вихрь. При этом малые вихри противоположного знака успешно избегают воздействия большого вихря, оставаясь существовать в виде локализованных структур вблизи крупного вихря [Dritschel, 1989]. Аналогичный процесс возможен и для трехмерных вихрей. Такой вариант рассмотрен в работе [Жмур и Панкратов, 1990; Жмур, 2011].

Филаментация оказывает существенное воздействие на симметризацию несимметричных вихрей. Численные эксперименты показывают, что первоначально эллиптическая относительно вертикали граница ядра искажается мелкомасштабными возмущениями, которые формируются за счет мелкомасштабной сдвиговой неустойчивости. Увеличиваясь, возмущения в дальнейшем вытягиваются в нити и наматываются на ядро вихря. Данная область, образованная вихревыми нитями, преобразуется в зону с плавно уменьшающейся завихренностью частиц, а ядро становится осесимметричным образованием с монотонно убывающей завихренностью от центра к периферии. С другой стороны, филаментация может быть причиной формирования трипольных вихревых структур. Если амплитуда возмущений значительно больше, то

вихревые нити способны покинуть область сопутствующего течения и оказаться в зоне рециркуляции. В дальнейшем нити будут накручиваться на два центра, расположенные симметрично относительно большой горизонтальной полуоси вне ядра вихря. Что в конечном итоге приведет к формированию триполя из монополярной структуры [Жмур, 2011].

ДАННЫЕ И МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ

В работе используются данные глобального океанического реанализа GLORYS12V1, предоставляемые CMEMS (Copernicus Marine Service – CMEMS). Данные имеют пространственное разрешение $1/12^\circ$ по широте и долготе и 50 уровней по вертикали, что позволяет использовать их для изучения мезомасштабных структур Мирового океана. GLORYS12V1 ассимилирует вдольтрековые данные с альтиметров высокого разрешения, а также спутниковые наблюдения за температурой поверхности моря, концентрацией морского льда и *in situ* профилями температуры и солёности. Основой реанализа является модель NEMO, реанализ ECMWF ERA-Interim используется в качестве форсинга. Временное разрешение использованных в работе данных составляет одни сутки.

Методы автоматической идентификации мезомасштабных вихрей в настоящее время очень активно развиваются. Они позволяют подробно изучать эволюцию характеристик вихрей во времени и пространстве. Алгоритмы идентификации можно разделить на две основные группы. Первая основана на физических свойствах и включает в себя анализ динамических полей; здесь вихри определяются, как замкнутые контуры, ограниченные каким-либо пороговым значением. Параметром для идентификации могут являться аномалии уровня моря, завихренность ζ или параметр Окубо-Вейса W . Ко второй группе относятся геометрические методы, использующие форму или кривизну мгновенного потока для обнаружения вихрей. Примером такого подхода может являться использование линий тока.

В нашей работе используется алгоритм первой группы, подробно описанный в работе [Faghmous и др., 2015]. Основой данного метода является анализ полей аномалий уровня океана, с помощью которых осуществляется процесс идентификации мезомасштабных вихрей, как замкнутых областей с положительными аномалиями уровня у антициклонов и отрицательными аномалиями у циклонов. Поскольку вихри Мирового океана не всегда имеют форму круга, их автоматическая идентификация сопряжена с наличием ряда неточностей.

Для контуров с круглой формой такая ошибка, определяемая, как отношение между общей площадью отклонений и площадью окружности, будет близка к нулю.

Существенным преимуществом используемого алгоритма идентификации, по сравнению с другими, является отход от строгих пороговых значений идентифицирующих признаков вихря, что позволяет самостоятельно устанавливать необходимые пределы характеристик вихрей, опираясь на особенности района и цели исследования. Алгоритм определяет вихрь, как область, ограниченная замкнутым контуром, содержащая один экстремум (максимум или минимум). Метод имеет ряд недостатков, однако, несмотря на них, алгоритм демонстрирует хорошую точность, позволяя идентифицировать 96,4% мезомасштабных вихрей [Faghtmous и др., 2015].

Идентификация вихрей начинается с нахождения экстремума в поле аномалий уровня для каждого вихря. Экстремум определяется как ячейка с максимальным по модулю значением аномалии в поле 5×5 ячеек сетки. Затем алгоритм на основе сравнения ячеек ищет контур, не нарушающий предположение о том, что вихрь может иметь лишь один экстремум. При постепенном увеличении контура вихря происходит захват в его область еще одного экстремума, что приводит к возвращению контура вихря на предыдущий шаг и выделению конечной области вихря.

Траектории вихрей рассчитываются по следующему алгоритму: каждая вихревая структура, обнаруженная в момент времени t , затем ищется в момент времени $t+1$ на определенном расстоянии, основанном на ожидаемой скорости распространения вихря, как длинной бароклинной волны Россби. Другие факторы могут также оказывать влияние на распространение вихря, однако предложенный подход хорошо согласуется со скоростью распространения вихря. Как только объект в момент времени t связывается с объектом в момент времени $t+1$, происходит сравнение их размеров, для того чтобы убедиться, что они являются схожими с физической точки зрения. Подробное описание метода дано в работе [Faghtmous и др., 2015]. Успешный опыт применения данного метода автоматической идентификации мезомасштабных вихрей можно найти в работах [Зинченко и др., 2019; Gordeeva и др., 2021].

В работе мы ограничили район исследования изобатой 3000 м, тем самым за границами исследуемого района остались основные струи Норвежского течения: фронтальное, склоновое и прибрежное течения [рис. 1](#). Область исследования

имеет площадь 98,6 тыс. км². На [рис. 2](#) схематически показано, что вихрь учитывается целиком, если он расположен внутри области, но, если в пределах котловины расположена только его часть, в дальнейшем исследуется только она.

КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Полная механическая энергия объема жидкости в океане определяется по формуле:

$$H = \frac{1}{2} \iiint \left[\rho_{\Sigma}(x, y, z) (u^2(x, y, z) + v^2(x, y, z)) + \frac{g^2}{\rho_0(z)} \frac{\rho^2(x, y, z)}{N^2(x, y, z)} \right] dx dy dz \quad (1)$$

где ρ_0 – средняя плотность морской воды по глубине моря, $\rho = (\rho_{\Sigma} - \rho_0)$ – отклонение текущей плотности ρ_{Σ} от ρ_0 на данном горизонте, u и v – зональная и меридиональная компоненты скорости потока, g – ускорение свободного падения, N – частота Брента-Вяйсяля. Интеграл берется по глубине от 0 до 1000 м в границах выделенной области.

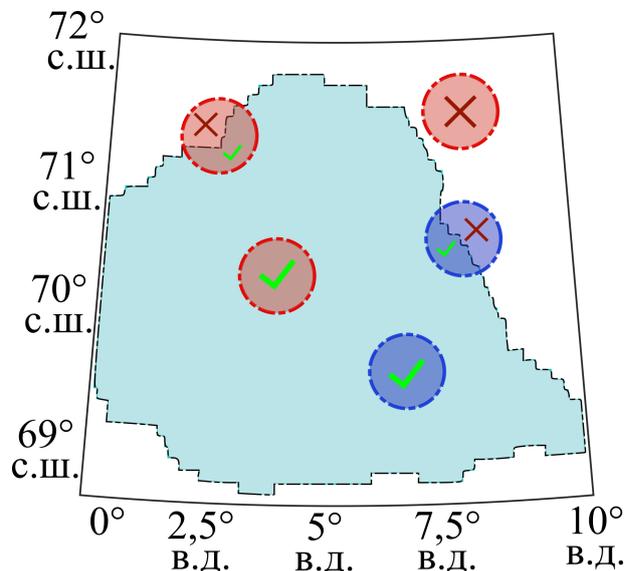


Рис. 2: Схема расчета кинетической и потенциальной энергии вихрей, выделенных методом автоматической идентификации. Галочками показаны области, для которых рассчитывалась энергия. Красным показаны антициклонические вихри, синим – циклонические. Пунктир ограничивает анализируемую область Лофотенской котловины.

В каждой точке акватории энергия столба жидкости единичной площади имеет вид:

$$H(x, y) = \frac{1}{2} \int \left[\rho_{\Sigma}(x, y, z) (u^2(x, y, z) + v^2(x, y, z)) + \frac{g^2}{\rho_0(z)} \frac{\rho^2(x, y, z)}{N^2(x, y, z)} \right] dx dy dz \quad (2)$$

где первое слагаемое – кинетическая энергия, а второе – потенциальная.

На первом этапе мы анализируем кинетическую и потенциальную энергию мезомасштабных вихрей – отдельно для циклонов и антициклонов. На рис. 2 видно, что кинетическая и потенциальная энергия вихрей учитывается целиком, если вихрь принадлежит области ЛК, ограниченной изобатой 3000 м. Если только часть области вихря принадлежит ЛК, то учитывается только часть. Важно отметить, что ЛК – район, который характеризуется повышенным вихреобразованием [Raj *u др.*, 2016; Сандалюк и Белоненко, 2021; Gordeeva *u др.*, 2021]. Топографические эксперименты в Норвежском море подтвердили высокую вероятность вихреобразования в ЛК, чему способствует как топографическая обособленность акватории, так и влияние неустойчивого Норвежского течения, стрессны которых проходят по западной и восточной периферии котловины [Belonenko *u др.*, 2021].

Мезомасштабные циклоны и антициклоны во множестве образуются в ЛК, в том числе, из-за непосредственного влияния струй неустойчивого Норвежского течения [Raj *u др.*, 2020; Сандалюк и Белоненко, 2021; Gordeeva *u др.*, 2021]. Отрываясь от струи, вихри дрейфуют к центру котловины, распределяя теплые и соленые атлантические воды по ее поверхности [Belonenko *u др.*, 2020]. Более того, наличие квазипостоянного антициклонического ЛВ в центре котловины также способствует высоким значениям вихревой энергии в котловине. Безусловно, мезомасштабные вихри в ЛК оказывают значительное влияние на ее энергетику, и это влияние подтверждено множеством исследований. В частности, в работах [Жмур *u др.*, 2021; 2022; Zhmur *u др.*, 2021; Травкин и Белоненко, 2021] дается оценка параметров вихревой активности и анализируются пространственные распределения характеристик Лофотенского вихря: характерный профиль температуры и солёности, плотности и частоты Брента-Вяйсяля, а также скорости течения, и на этом примере дается расчет потенциальной и кинетической энергии вихря.

На следующем этапе мы оцениваем энергию суммарно для всех вихрей в акватории в период 1993–2019 гг., которые были выделены методом автоматической идентификации. Результаты представлены на рис. 3. Видно, что кинетическая энергия не превышает $2,0 \times 10^7$ Дж для цикло-

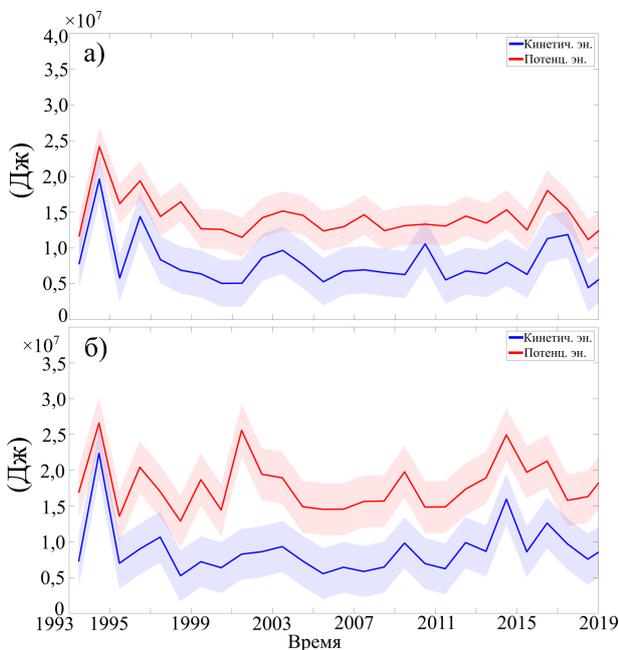


Рис. 3: Межгодовая изменчивость суммарной вихревой кинетической и потенциальной энергии для циклонов (а) и антициклонов (б).

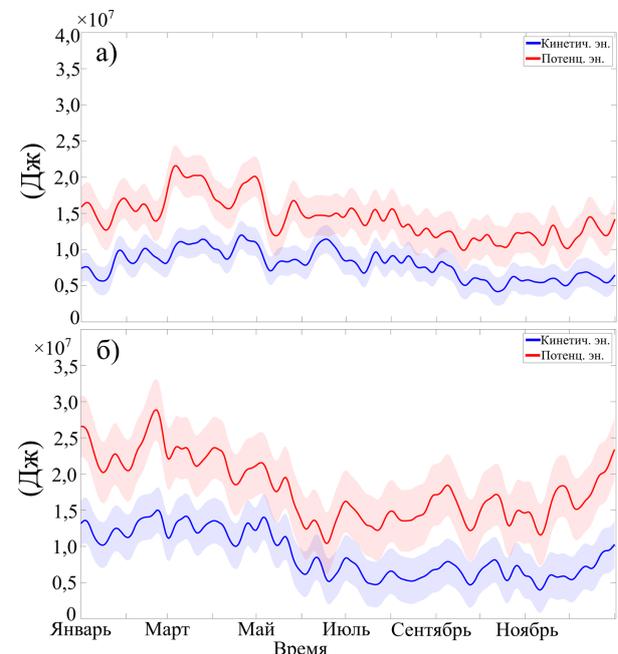


Рис. 4: Сезонный ход суммарной вихревой кинетической и потенциальной энергии для циклонов (а) и антициклонов (б). Осреднение за 1993–2019 гг.

Таблица 1: Средние оценки общей кинетической и потенциальной энергии ЛК, энергии мезомасштабных вихрей и суммарно энергии филаментов и фоновых течений

Энергия		Среднее значение (Дж)	СКО (Дж)
Тип	потенциальная	$3,52 \times 10^8$	$4,11 \times 10^7$
Общая энергия	кинетическая	$2,30 \times 10^8$	$2,98 \times 10^7$
	потенциальная	$3,84 \times 10^8$	$3,12 \times 10^7$
Вихревая энергия	кинетическая	$1,59 \times 10^7$	$6,33 \times 10^6$
	потенциальная	$3,23 \times 10^7$	$5,43 \times 10^6$
Энергия филаментов и фонового течения	кинетическая	$2,14 \times 10^8$	$2,87 \times 10^7$
	потенциальная	$3,52 \times 10^8$	$3,03 \times 10^7$

нов и $2,3 \times 10^7$ Дж для антициклонов. Потенциальная энергия не превышает $2,4 \times 10^7$ Дж для циклонов и $2,7 \times 10^7$ Дж для антициклонов. Таким образом, значения как кинетической, так и потенциальной энергии для антициклонов незначительно превышают значения для циклонов. Отметим также, что как для циклонов, так и для антициклонов, в среднем вихревая потенциальная энергия в 2–3 раза превышает значения вихревой кинетической энергии, хотя в отдельные промежутки, например в 1994 г., разница в значениях не столь значительна.

Похожие тенденции наблюдаются и для сезонной изменчивости вихревой энергии ЛК рис. 4. Увеличение энергии в зимние месяцы, очевидно, обусловлено влиянием внешних факторов, в частности, усилением ветра в зимний период, а также влиянием зимней конвекции. Минимальные значения энергии наблюдаются в летние месяцы [Травкин и Белоненко, 2021].

Ясно, что не только вихри дают вклад в энергетику котловины. В акватории наблюдается множество филаментов, а также значительный энергетический вклад дает фоновое течение. Последние факторы не учитывались в расчетах, представленных на рис. 3 и рис. 4, так как эти структуры не выделяются методом автоматической идентификации. Оценим теперь осредненную кинетическую и потенциальную энергию всей котловины целиком (общая энергия), а также отдельно разницу между общей и вихревой энергией.

На рис. 5, показаны средние значения кинетической и потенциальной энергии для ЛК, рассчитанные по формуле (2) для каждой точки акватории. Видно, что наиболее энергоактивными областями является район месторасположения ЛВ, а также периферия акватории, рядом со струями основных течений. Наименьшие значения соответствуют центральной части района вне обла-

сти расположения квазипостоянного ЛВ. Характерно, что в целом значения потенциальной энергии существенно превышают значения кинетической энергии. Возникает вопрос: какая доля энергии, представленная на рис. 5, относится непосредственно к вихрям, а какая характеризуется другими структурами?

Ответ на это вопрос дают графики на рис. 6, где показана межгодовая и сезонная изменчивость общей кинетической и потенциальной энергии в ЛК. Отметим, что во все годы потенциальная энергия превышает кинетическую в 1,5–2 раза. На рис. 6 также видно, что как кинетическая, так и потенциальная энергия в зимние месяцы превышают значения для летнего периода.

Таким образом, сравнительный анализ энергетического вклада вихрей с другими динамическими структурами приводит к неожиданному результату. Оказывается, что вклад энергии филаментов и фонового течения почти на порядок превышает вклад вихрей. На рис. 6, видно, что основной вклад в энергетику котловины дают вовсе не вихри, а другие динамические структуры – филаменты и фоновое течение. Осреднив значения

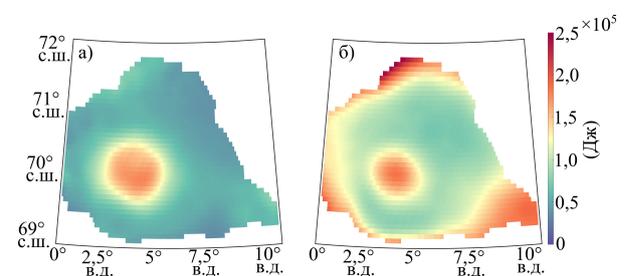


Рис. 5: Пространственное распределение общей средней кинетической (а) и потенциальной (б) энергии (Дж) в Лофотенской котловине. Осреднение за период 1993–2019 гг.

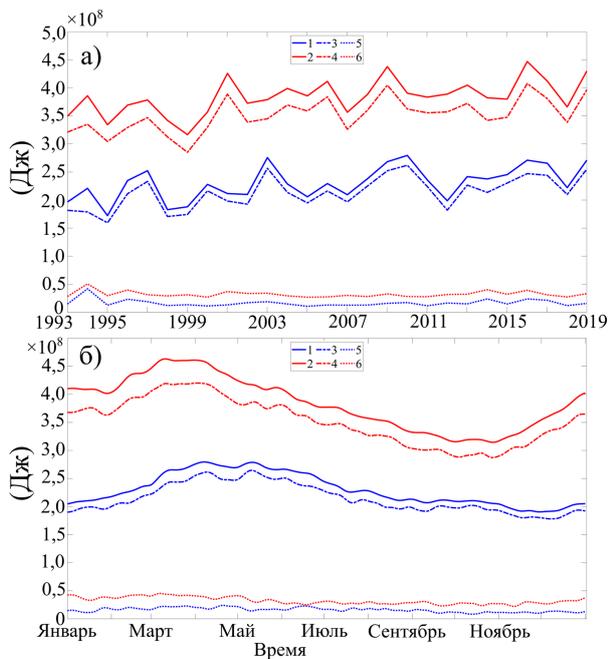


Рис. 6: Межгодовая (а) и сезонная (б) изменчивость общей кинетической и потенциальной энергии ЛК (Дж): 1 – общая кинетическая энергия, 2 – общая потенциальная энергия, 3 – кинетическая энергия филаментов и фоновых течений, 4 – потенциальная энергия филаментов и фоновых течений, 5 – кинетическая энергия мезомасштабных вихрей, 6 – потенциальная энергия мезомасштабных вихрей. Осреднение за период 1993–2019 гг.

за период 1993–2019 гг., мы получаем, что вклад кинетической энергии вихрей (суммарно циклонов и антициклонов) в общую кинетическую энергию в ЛК составляет 7,3%, а вклад потенциальной энергии вихрей в общую потенциальную энергию – 8,4%. Таким образом, мезомасштабные вихри, безусловно, влияют на энергетику ЛК, но основной вклад дают другие динамические структуры – филаменты и фоновое течение.

Результаты сравнительного анализа кинетической и потенциальной энергии для различных структур приведены в табл. 1.

Выводы

Существует множество публикаций о том, что ЛК является регионом, который отличается повышенным вихреобразованием и который характеризуется повышенными локальными максимумами дисперсии уровня океана и кинетической энергии мезомасштабных вихрей. Общеизвестно, что мезомасштабные вихри оказывают существенное влияние на энергетику ЛК (см. обзор в работе

[Травкин и Белоненко, 2021]). В работе по данным океанического реанализа GLORYS12V1 проанализированы составляющие кинетической и потенциальной энергии в ЛК. Для акватории, ограниченной изобатой 3000 м, нами получены три типа оценок: общие кинетическая и потенциальная энергия для каждой точки акватории, а также их средние значения, средняя энергия мезомасштабных вихрей (отдельно для циклонов и антициклонов, а также суммарно), средняя энергия филаментов и фоновых течений. Для оценки вихревой энергии обоих типов применяется метод автоматической идентификации вихрей [Faghtmous и др., 2015] с дискретностью один сутки в период 1993–2019 гг., позволяющий оценить вихревую энергию отдельно для выделенных в процессе идентификации областей.

Для каждого типа энергии проанализированы межгодовая изменчивость и сезонный ход. Установлено, что вихревая потенциальная энергия в среднем превышает вихревую кинетическую энергию в 2–3 раза. В зимние месяцы наблюдаются повышенные значения энергии по сравнению с летними, что обусловлено влиянием внешних факторов (ветер и зимняя конвекция).

Пространственное распределение значений общей энергии по акватории показывает доминирование потенциальной энергии относительно кинетической. При этом основными энергоносителями районами являются область расположения квазипостоянного ЛВ и периферия исследуемого района.

Оценки средней энергии, полученные для всей акватории и отдельно для вихревых областей, показывают, что вклад вихрей в общую энергетику котловины невелик по сравнению с энергией филаментов и фоновых течений. Доля кинетической энергии вихрей составляет 7,29%, а потенциальной энергии – 8,41%. Это означает, что основной вклад в энергетику котловины дают не мезомасштабные вихри, а другие динамические структуры – филаменты и фоновое течение.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-27-00004. В. В. Жмур поддержан средствами государственного бюджета по государственному заданию № 0128-2021-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жмур В. В. Мезомасштабные вихри океана. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 289. – ISBN 978-5-89118-534-0.

- 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](https://doi.org/10.31857/S0002351521050151).
- 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](https://doi.org/10.31857/S0030157422030170).
- Жмур В. В., Панкратов К. К. Динамика мезомасштабного вихревого образования в поле течения крупного интенсивного вихря // Океанология. — 1990. — Т. 30, № 2. — С. 170–178.
- Зинченко В. А., Гордеева С. М., Собко Ю. В. *и др.* Мезомасштабные вихри Лофотенской котловины по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 46–54. — DOI: [10.7868/S2073667319030067](https://doi.org/10.7868/S2073667319030067).
- Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В. Сезонная изменчивость термохалинной структуры мезомасштабных вихрей в регионе Лофотенской котловины // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2021. — Т. 14, № 1. — С. 15–30. — DOI: [10.7868/S2073667321010020](https://doi.org/10.7868/S2073667321010020).
- 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](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-318-332).
- Artal O., Sepúlveda H. H., Mery D., *et al.* Detecting and characterizing upwelling filaments in a numerical ocean model // Computers & Geosciences. — 2019. — Vol. 122. — P. 25–34. — DOI: [10.1016/j.cageo.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.005).
- Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., *et al.* Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // Russian Journal of Earth Sciences. — 2020. — Vol. 20. — ES6011. — DOI: [10.2205/2020ES000720](https://doi.org/10.2205/2020ES000720).
- Belonenko T., Travkin V. S., Koldunov A. V., *et al.* Topographic experiments over dynamical processes in the Norwegian Sea // Russian Journal of Earth Sciences. — 2021. — Vol. 21. — ES1006. — DOI: [10.2205/2020ES000747](https://doi.org/10.2205/2020ES000747).
- Dritschel D. G. On the stabilization of a two-dimensional vortex trip by adverse shear // Journal of Fluid Mechanics. — 1989. — Vol. 206. — P. 193–221.
- Faghmous J. H., Frenger I., Yao Y., *et al.* A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // Scientific Data. — 2015. — Vol. 2. — P. 150028. — DOI: [10.1038/sdata.2015.28](https://doi.org/10.1038/sdata.2015.28).
- Gordeeva S., Zinchenko V., Koldunov A., *et al.* Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten Basin from satellite altimetry // Advances in Space Research. — 2021. — Vol. 68, no. 2. — P. 364–377. — DOI: [10.1016/j.asr.2020.05.043](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.043). — Special issue: 25 Years of Progress in Radar Altimetry.
- Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow // Journal of the Physical Society of Japan. — 1981. — Vol. 50, no. 10. — P. 3517–3520. — DOI: [10.1143/JPSJ.50.3517](https://doi.org/10.1143/JPSJ.50.3517). — eprint: <https://doi.org/10.1143/JPSJ.50.3517>.
- McWilliams J. C., Colas F., Molemaker M. J. Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines // Geophysical Research Letters. — 2009. — Vol. 36, no. 18. — P. L18602. — DOI: [10.1029/2009GL039402](https://doi.org/10.1029/2009GL039402). — eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2009GL039402>.
- Raj R. P., Chafik L., Nilsen J. E. Ø., *et al.* The Lofoten Vortex of the Nordic Seas // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2015. — Vol. 96. — P. 1–14. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.011>.
- Raj R. P., Halo I., Chatterjee S., *et al.* Interaction Between Mesoscale Eddies and the Gyre Circulation in the Lofoten Basin // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2020. — Vol. 125, no. 7. — e2020JC016102. — DOI: [10.1029/2020JC016102](https://doi.org/10.1029/2020JC016102). — eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020JC016102>.
- Raj R. P., Johannessen J. A., Eldevik T., *et al.* Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2016. — Vol. 121, no. 7. — P. 4503–4521. — DOI: [10.1002/2016JC011637](https://doi.org/10.1002/2016JC011637). — eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2016JC011637>.
- Travkin V. S., Belonenko T. 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](https://doi.org/10.2205/2019es000676).
- 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, no. 4. — P. 738–743. — DOI: [10.1002/grl.150126](https://doi.org/10.1002/grl.150126).
- 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](https://doi.org/10.1134/S0001437021060333).



CONTRIBUTION OF MESOSCALE EDDIES TO ENERGY OF THE LOFOTEN BASIN

V. S. Travkin^{*1}, V. V. Zhmur², T. V. Belonenko¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Correspondent author: vtravkin99@gmail.com

Received 9 April 2022; accepted 30 June 2022; published 17 July 2022

A comparative assessment of the contribution of eddies and other dynamic structures to the energy of the Lofoten Basin is carried out. The basis of the study is the data of global ocean reanalysis GLORYS12V1 for 1993–2019. We estimate the total kinetic and potential energy as well as the corresponding contribution of eddy energy for a region bounded by an isobath of 3000 m. We use the method of automatic identification of vortices for the analysis which allows us to calculate the eddy kinetic and potential energy in the automatically selected areas of the eddies. We establish that the potential energy of both cyclones and anticyclones is on average 2–3 times higher than the kinetic energy values, and the energy values of kinetic and potential for anticyclones dominate relative to the energy of cyclones. We also consider the interannual variability and seasonal course of eddy kinetic and potential energy. The seasonal course revealed an increase in both types of energy in the winter months. It is established that the contribution of eddies to the total energy of the basin is small. The contribution of eddy kinetic energy to the total energy of the basin is 7.3%, and the contribution of eddy potential energy is 8.4%. This means that the main contribution to the energy of the basin is made not by mesoscale eddies, but by other dynamic structures i.e. filaments and background flow.

Keywords: Lofoten Basin, mesoscale vortices, kinetic and potential energy, filaments, identification method, GLORYS12V1.

Citation: Travkin, V. S., V. V. Zhmur, and T. V. Belonenko, (2022), Contribution of mesoscale eddies to energy of the Lofoten Basin, *Russ. J. Earth. Sci.*, v. 22, ES4002, 10.2205/2022ES000802.

REFERENCES

- Artal O. Detecting and characterizing upwelling filaments in a numerical ocean model // *Computers & Geosciences*. — 2019. — Vol. 122. — P. 25–34. — DOI: [10.1016/j.cageo.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.005).
- Belonenko T. Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2020. — Vol. 20. — P. 6011. — DOI: [10.2205/2020ES000720](https://doi.org/10.2205/2020ES000720).
- Belonenko T. Topographic experiments over dynamical processes in the Norwegian Sea // *Russ. J. Earth. Sci.* — 2021. — Vol. 21, ES1006. — DOI: [10.2205/2020ES000747](https://doi.org/10.2205/2020ES000747).
- Dritschel D. On the stabilization of a two-dimensional vortex trip by adverse shear // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1989. — Vol. 206. — P. 193–221.
- Faghmous J. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // *Scientific Data*. — 2015. — Vol. 2. — P. 150028. — DOI: [10.1038/sdata.2015.28](https://doi.org/10.1038/sdata.2015.28).
- Gordeeva S. Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten Basin from satellite altimetry // *Advances in Space Research*. — 2020. — Vol. 68, 2. — P. 364–377. — DOI: [10.1016/j.asr.2020.05.043](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.043).
- Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in Uniform shear flow // *J. phys. Soc. Japan*. — 1981. — Vol. 50, no. 10. — P. 3517–3520.
- McWilliams J., Colas F., Molemaker M. Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines // *Geophysical Research Letters*. — 2009. — Vol. 36. — P. L18602. — DOI: [10.1029/2009GL039402](https://doi.org/10.1029/2009GL039402).
- Raj R. P., Halo I., Chatterjee S., *et al.* Interaction Between Mesoscale Eddies and the Gyre Circulation in the Lofoten Basin // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2020. — Vol. 125, no. 7. — e2020JC016102. — DOI: [10.1029/2020JC016102](https://doi.org/10.1029/2020JC016102).

- Raj R. P., Johannessen J. A., Eldevik T., *et al.* Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2016. — Vol. 121, no. 7. — P. 4503–4521. — DOI: [10.1002/2016JC011637](https://doi.org/10.1002/2016JC011637).
- Raj R. P., Chafik L., Nilsen J. E. Ø., *et al.* The Lofoten Vortex of the Nordic Seas // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2015. — Vol. 96. — P. 1–14. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.011>.
- Sandalyuk N., Belonenko T. Seasonal Variability of the Thermohaline Structure of the Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. — 2021. — Vol. 14, no. 1. — P. 15–30. — DOI: [10.7868/S2073667321010020](https://doi.org/10.7868/S2073667321010020). — (in Russian).
- Travkin V., Belonenko T. 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](https://doi.org/10.2205/2019ES000676).
- Travkin V., Belonenko T. Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on Energy Analysis, *Physical Oceanography*: [e-journal]. — 2021. — DOI: [10.22449/1573-160X-2021-3-294-308](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-3-294-308).
- Volkov D., Belonenko T., Foux V. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin - a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophysical Research Letters*. — 2013. — Vol. 40. — P. 738–743. — DOI: [10.1002/grl.50126](https://doi.org/10.1002/grl.50126).
- Zhmur V. Mesoscale eddies of Global Ocean // *GEOS, Moscow*. — 2011. — Vol. 289.
- Zhmur V., Novoselova E., Belonenko T. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1 // *Oceanology*. — 2021a. — Vol. 61, no. 6. — P. 830–838. — DOI: [10.1134/S0001437021060333](https://doi.org/10.1134/S0001437021060333).
- Zhmur V., Novoselova E., Belonenko T. Potential vorticity in the Ocean: Ertel and Rossby approaches with estimates for the Lofoten Vortex, *Izv // Atmos. Ocean. Phys.* — 2021b. — Vol. 57, no. 6. — P. 632–641. — DOI: [10.1134/S0001433821050157](https://doi.org/10.1134/S0001433821050157).
- Zhmur V., Novoselova E., Belonenko T. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 2 // *Oceanology*. — 2022. — Vol. 62, no. 3. — P. 289–302. — DOI: [10.1134/S0001437022030171](https://doi.org/10.1134/S0001437022030171).
- Zhmur V., Pankratov K. Dynamics of mesoscale vortex formation in the flow field of a large intense vortex // *Oceanology*. — 1990. — Vol. 30, no. 2. — P. 170–178. — (in Russian).
- Zinchenko V. A. Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. — 2019. — Vol. 12, no. 3. — P. 46–54. — DOI: [10.7868/S2073667319030067](https://doi.org/10.7868/S2073667319030067).