

## Мезомасштабные вихри Алеутского жёлоба

С. П. Худякова<sup>1</sup>, В. С. Травкин<sup>1,2</sup>, Т. В. Белоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: khydyakova.s@gmail.com

<sup>2</sup> Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова  
Москва, 119034, Россия

Рассмотрены траектории мезомасштабных антициклонических и циклонических вихрей к югу от Алеутской гряды на различных участках топографии. Показано, что антициклонические вихри распространяются вдоль шельфовой зоны Алеутских о-вов, а траектории циклонических вихрей расположены южнее — вдоль Алеутского жёлоба с глубинами 5–7 км. Получены оценки количества мезомасштабных вихрей и их генераций на одну ячейку  $0,25 \times 0,5^\circ$  (по широте и долготе соответственно). Установлено, что в рассматриваемом районе доминируют антициклоны, при этом максимальное их число наблюдается к югу от островов Ближние и Крысьи. Проанализированы физические механизмы, влияющие на распространение мезомасштабных вихрей региона. Проведён анализ сравнительного вклада слагаемых в дисперсионное уравнение для баротропных топографических волн Россби:  $\beta$ -эффекта, меридионального градиента зонального сдвига скорости потока, топографического фактора и совместного действия течения и топографии. Расчёт по средним значениям зональной компоненты скорости показывает доминирование топографического фактора на большей части акватории, а для отдельных дней меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока преобладает над другими слагаемыми. Показано, что отрыв вихрей от жёлоба происходит под действием течения в районе  $171\text{--}176^\circ$  в. д.

**Ключевые слова:** мезомасштабные вихри, спутниковая альтиметрия, Алеутский жёлоб, METAZ.2 DT, GLORYS12V1

Одобрена к печати: 20.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-211-221

### Введение

В северной части Тихого океана выделяют Японский, Курило-Камчатский и Алеутский жёлоба, имеющие глубины более 7500 м. Этот особый рельеф отражается в генерации, эволюции и перемещении мезомасштабных вихрей. По определению авторов работы (Saito et al., 2016), алеутские вихри — это мезомасштабные антициклонические вихри, образующиеся в районе прохождения Аляскинского течения к югу от Алеутской гряды. Однако в районе Алеутского жёлоба образуются не только антициклоны, но и циклоны. Аляскинское течение — одна из наиболее вихреактивных зон не только северной части Тихого океана, но и всего Мирового океана (Chelton et al., 2011). Впервые образование антициклонических вихрей к югу от Алеутской гряды по данным спутниковых наблюдений было отмечено в статье (Okkonen, 1992). Они образуются непосредственно над Алеутским жёлобом или вблизи него и некоторое время застаиваются там (Budyansky et al., 2022). После отделения от Аляскинского течения они движутся либо на юго-запад, либо на северо-запад к Камчатке, пересекая северную часть цепи подводных гор Императорского хребта (Saito et al., 2016; Ueno et al., 2010). Пересечение подводных гор сопровождается деформацией вихрей. Так, согласно работе (Пранц, 2021), на большинство Алеутских вихрей оказывает влияние возвышенность Детройт с горизонтальным масштабом  $165 \times 70$  км. Бароклинный радиус деформации Россби в районе Алеутского жёлоба не превышает 15 км (Белоненко, Кубряков, 2014; Chelton et al., 1998), в то время как радиус Алеутских вихрей оценивается в 50 км и более (Budyansky et al., 2022), что позволяет относить их к мезомасштабным.

Мезомасштабные вихри являются важной частью целостной динамической системы Мирового океана, поскольку активно участвуют в перераспределении тепла, массы и соли, а также биохимических характеристик на большие расстояния. Алеутские вихри после отделения от Аляскинского течения проходят через западный субарктический круговорот, перенося трансформированные воды зал. Аляска в западную часть тихоокеанской Субарктики (Андреев, 2020). В дополнение к водообмену между регионом Алеутских о-вов и западной и центральной частями тихоокеанской Субарктики вихри Аляскинского течения могут влиять на водообмен между северной частью Тихого океана и Беринговым морем (Ueno et al., 2009).

На рис. 1 представлена батиметрия исследуемого района. К югу от Алеутской гряды располагается значительное понижение рельефа — Алеутский жёлоб. Он приурочен к Алеутской островной дуге и протягивается на 3400 км от п-ова Аляска до п-ова Камчатка при ширине 40–100 км по изобате 5500 м. Максимальная глубина по различным оценкам составляет от 7670 до 7855 м и расположена в центральной части жёлоба. Также в средней части на глубине около 1800 м находится широкая (до 50 км) подводная терраса. Уклон дна к островной части оценивается от 4 до 12°. У западной границы в районе Командорских о-вов Алеутский жёлоб переходит в Курило-Камчатский жёлоб, имеющий юго-западное простирание.

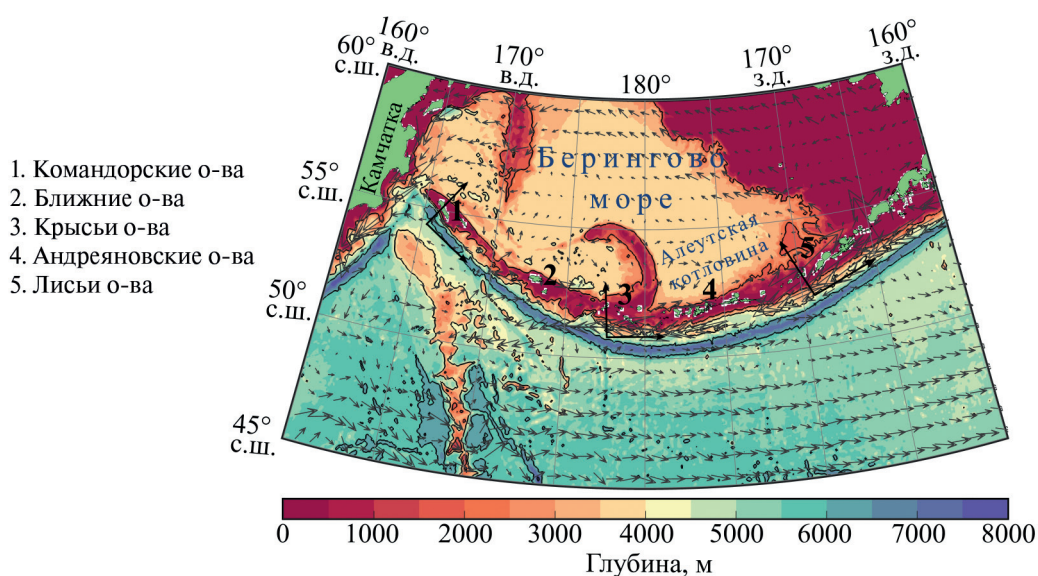


Рис. 1. Батиметрическая карта района по данным ETOPO1 (англ. Earth Topography 1-minute). Чёрными стрелками нанесены прямоугольные системы координат. Цифрами обозначены группы Алеутских о-вов. Серыми стрелками отображена скорость течения на поверхности, осреднённая за период 1993–2021 гг. по данным GLORYS12V1 (англ. Global Ocean Physics Reanalysis)

С. В. Пранц (2021) считает, что большинство вихрей, оторвавшихся от Алеутского жёлоба, дрейфуют на запад или юго-запад к Камчатскому п-ову под действием планетарного бета-эффекта. В. С. Травкин с коллегами (2022) установили, что для систем вихрей, распространяющихся вдоль Курильского жёлоба, топографический фактор на несколько порядков превосходит все остальные слагаемые в дисперсионном уравнении для баротропных топографических волн Россби, включая планетарный бета-эффект. Топографические уклоны дна в Алеутском жёлобе сравнимы с уклонами Курильского жёлоба. Однако алеутские вихри, распространяясь вдоль жёлоба на запад, в какой-то момент отрываются от него и меняют траекторию, несмотря на то что вклад топографии по-прежнему имеет существенное значение и превышает вклад бета-эффекта в дисперсионном уравнении. Что заставляет вихри отрывать от жёлоба? Каковы оценки слагаемых в дисперсионном уравнении на момент отрыва вихрей? Анализ этих вопросов и стал целью настоящего исследования.

## Данные и методы

### МЕТА3.2 DT

Атлас мезомасштабных вихрей МЕТА3.2 DT (*англ.* Mesoscale Eddy Trajectory Atlas) — продукт французского агентства AVISO (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product/meta3-2-dt.htm>). В его основе лежит использование данных спутниковой альтиметрии для идентификации и определения траекторий мезомасштабных вихрей Мирового океана. Вихри идентифицируются как замкнутые структуры диаметром от нескольких десятков до сотен километров. После фильтрации обнаруживаются экстремумы в поле аномалий уровня моря для определения местоположения и характеристик вихря. В работе были использованы траектории долгоживущих (более 10 сут) антициклонических и циклонических вихрей и их основные параметры (амплитуда, радиус, площадь, орбитальная скорость, скорость перемещения и период жизни). Временной промежуток, рассмотренный в работе, составляет 29 лет: от 1 января 1993 г. до 31 декабря 2021 г.

### GLORYS12V1

Массив GLORYS12V1 — глобальный океанический реанализ, охватывающий данные спутниковой альтиметрии с 1993 г. GLORYS12V1 основан на системе глобального прогнозирования CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service, <http://marine.copernicus.eu>) в реальном времени. Является продуктом Европейского центра морских прогнозов. В основе реанализа лежит гидродинамическая модель NEMO (*англ.* Neural Models), атмосферный форсинг задаётся при помощи ECMWF ERA-Interim (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis) (для последних лет используется ERA5). Наблюдения усваиваются при помощи фильтра Калмана пониженного порядка. В основе реализации модели лежит ассимиляция данных не только аномалий уровня моря по спутниковой альтиметрии, но и совместно усваиваемые спутниковые (температура поверхности моря, сплочённость морского льда) и *in situ* данные (вертикальные профили температуры и солёности). Продукт включает в себя ежедневные и среднемесячные значения температуры, солёности, компоненты скорости течения, уровня моря, глубины перемешанного слоя и параметров ледяного покрова. Выходные данные отображаются на стандартной регулярной сетке с пространственным разрешением  $1/12^\circ$  (приблизительно 8 км) и на 50 стандартных уровнях. В работе были использованы суточные и среднемесячные значения зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) компонент скорости течения на поверхности для всего доступного периода от 1993 до 2021 г.

### ETOPO1

Глобальная модель рельефа ETOPO1 объединяет данные топографии, батиметрии и береговой линии из региональных и глобальных наборов данных для всестороннего отображения информации в высоком разрешении. Массив доступен на сайте американского подразделения Национального управления океанических и атмосферных исследований (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA, <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>). Массив привязан по вертикали к уровню моря, а по горизонтали — к Всемирной геодезической системе 1984 г. (WGS 84 — *англ.* World Geodetic System). Размер ячейки составляет одну угловую минуту. В настоящей работе был использован набор батиметрической информации, отображённой на пространственной координатной сетке с шагом 500 м.

## Теоретическое обоснование: сравнительный вклад слагаемых в дисперсионное уравнение для баротропных топографических волн

Волны Россби относятся к классу градиентно-вихревых волн, и их распространение осуществляется по закону сохранения потенциальной завихренности:

$$\frac{d_h}{dt} \left( \frac{\zeta + f}{H} \right) = 0,$$

где  $\frac{d_h}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y}$ ;  $x$  и  $y$  — зональная и меридиональная переменные в прямоугольной системе координат;  $t$  — время;  $U$  и  $V$  — зональная и меридиональная компоненты скорости течения;  $f$  — параметр Кориолиса;  $H$  — глубина;  $\zeta$  — относительная завихренность,  $\zeta = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}$ . На шельфе потенциальная завихренность возникает вследствие увеличения глубины в направлении, перпендикулярном крупномасштабной топографической неровности (Mysak, LeBlond, 1978).

Применим теорию, описанную в работах (Гневышев и др., 2019, 2021; Gnevyshev et al., 2022), по оценке слагаемых в дисперсионном соотношении для волн Россби на сдвиговом потоке с учётом топографии. Введём выражение для «эффективного»  $\beta$ -эффекта ( $\beta^*$ ):

$$\beta^* = \beta \cos \theta - U_{\eta\eta} - \frac{fH_{\eta}}{H} + \frac{U_{\eta}H_{\eta}}{H}, \quad (1)$$

где  $\beta = df/dy$ ; для участка, на котором Аляскинское течение и Алеутский жёлоб имеют незональное распространение, используется система координат с поворотом на угол  $\theta$  относительно системы координат  $(x, y)$ ;  $\eta$  — ось ординат повернутой системы (см. рис. 1). Формулы преобразования даны в работе (Gnevyshev et al., 2022). Согласно теории, отдельные члены уравнения (1) будут описывать различные механизмы, влияющие на распространение мезомасштабных вихрей исследуемого региона:  $\beta$ -эффект (1-е слагаемое), меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока (2-е слагаемое), топографический фактор (3-е слагаемое) и совместное действие течения и топографии (4-е слагаемое).

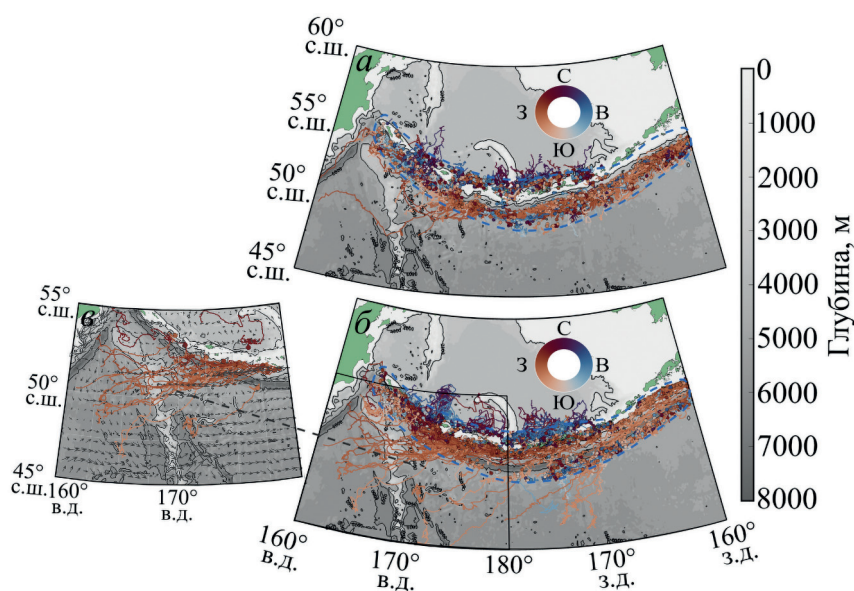


Рис. 2. Траектории мезомасштабных циклонических (а) и антициклонических (б) вихрей, место отрыва антициклонических вихрей от жёлоба (в) по данным META3.2 DT за период 1993–2021 гг. Точками отмечены места генерации вихрей, цветом — направление вихрей. Чёрными линиями отображены изобаты, чёрными стрелками нанесены скорости течения на поверхности по данным GLORYS12V1. Синим пунктиром показана маска — граница исследуемых вихрей

## Анализ траекторий мезомасштабных вихрей Алеутского жёлоба

Рассмотрим траектории долгоживущих мезомасштабных антициклонических и циклонических вихрей, сформированных в районе Алеутской гряды за период 1993–2021 гг. (рис. 2, см. с. 214). Вихри, сформированные к югу от Алеутской гряды, дрейфуют преимущественно на запад вдоль островов архипелага, отдельные антициклонические вихри мигрируют на юго-запад, пересекая жёлоб, что наблюдается почти на всём рассмотренном участке от 170° в.д. до 170° з.д. Для циклонических вихрей характерным представляется распространение на запад вдоль жёлоба. Выделяется отдельный циклонический вихрь, достигший Командорских о-вов (в районе 162° в.д.) и в дальнейшем мигрировавший на юг вдоль Курило-Камчатского жёлоба. Отметим, что лишь один циклонический вихрь отрывается от жёлоба и пересекает северную часть цепи подводных гор Императорского хребта в районе 170° в.д., в то время как почти все антициклонические вихри, отделившиеся от жёлоба к западу от 173° в.д., пересекли систему подводных гор Императорского хребта. Направление вихрей, сформированных к северу от Алеутской гряды, определяется преимущественно восточным направлением. Среди них присутствуют антициклонические и циклонические вихри, направленные на север, особенно у проливов Амчитка и Ближний.

### Оценка количества мезомасштабных вихрей и их генераций на ячейку

Рассмотрим изображения, иллюстрирующие число генераций мезомасштабных вихрей на одну ячейку координатной сетки шагом 0,25° по широте и 0,5° по долготе, а также общее число вихрей на ячейку (рис. 3). Наибольшее количество антициклонов (от 80 до 100 вихрей на ячейку) наблюдается к югу от островов Ближние и Крысьи примерно между 173–180° в.д., а также к югу от о. Унимак в районе 163° з.д. (Лисьи о-ва, см. рис. 1). Циклонические вихри в количестве от 70 до 80 на ячейку располагаются к югу от Крысьих о-вов в пространственных координатах 170–162° з.д.

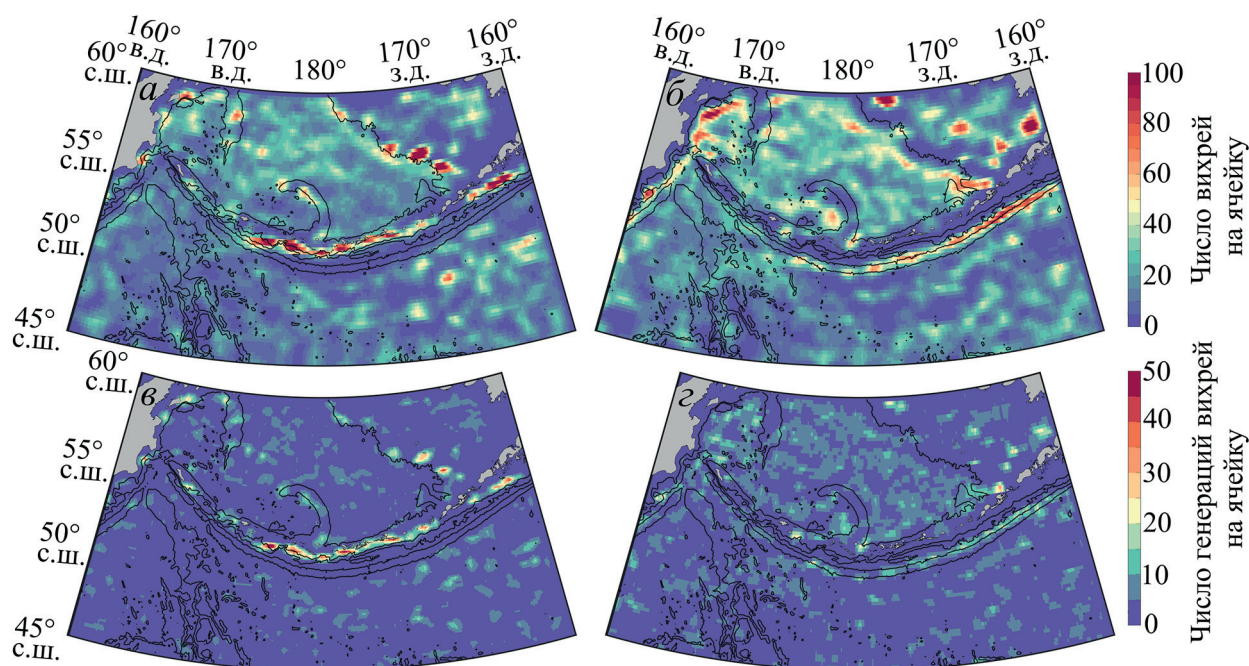


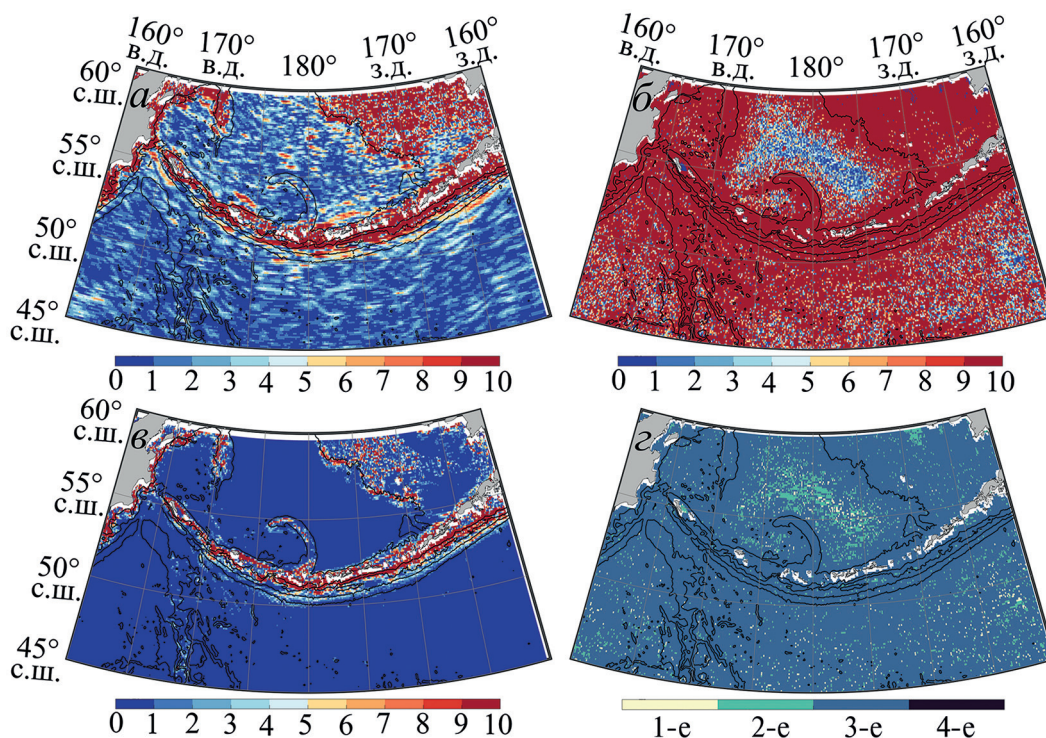
Рис. 3. Количество мезомасштабных антициклонических (а) и циклонических (б) вихрей, число генераций мезомасштабных антициклонических (в) и циклонических (г) вихрей на ячейку (0,25° по широте, 0,5° по долготе) по данным METAZ.2 DT за период 1993–2021 гг. Чёрным цветом отображены изобаты

Отметим, что антициклонические вихри локализуются в шельфовой зоне ближе к островам Алеутского архипелага, а циклонические располагаются узкой полосой вдоль линии Алеутского жёлоба.

Максимальное число генераций антициклонических вихрей составляет 40–50 на ячейку и фиксируется между островами Ближние и Крысьи (176° в.д.) и к югу от о. Танага у 178° з.д. (Андрейновские о-ва, см. *рис. 1*). Также большое количество антициклонов (от 30 до 40 на ячейку) формируется у Крысьих о-вов между 177 и 180° в.д. и у о. Атка (Андрейновские о-ва, см. *рис. 1*) в районе 175° з.д. Генерация циклонических вихрей происходит менее активно, максимальное число генераций достигает 20 вихрей на ячейку и располагается к востоку от о. Агатту (Ближние о-ва, см *рис. 1*), примерно у 52° с. ш., 175° в.д.

### Сравнительный анализ вклада слагаемых в дисперсионном соотношении для волн Россби на сдвиговом потоке с учётом топографии

Оценим вклад различных факторов, влияющих на перемещение вихрей. На *рис. 4* представлены: меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока (2-е слагаемое), топографический фактор (3-е слагаемое) и совместное действие течения и топографии (4-е слагаемое), нормированные на 1-е слагаемое уравнения (1). Видно, что наибольшее влияние течения прослеживается в районе прохождения струйного Аляскинского течения — к югу от Алеутской гряды, от зал. Аляска до центральной части гряды. Однако действие течения, вероятно, не оказывает столь сильного влияния на отрыв вихрей в сравнении с остальными рассмотренными параметрами, поскольку это действие локально: выделяются лишь небольшие зоны преобладания меридионального градиента зонального сдвига скорости потока над  $\beta$ -эффектом. Это может быть связано с использованием средних за рассмотренный период с 1991 по 2021 г. значений зональной компоненты скорости, а не за конкретный день, как это показано на *рис. 4*.



*Рис. 4.* Слагаемые «эффективного»  $\beta$ -эффекта по модулю: *a* — 2-е, *b* — 3-е, *v* — 4-е, нормированные на 1-е слагаемое; *z* — доминирующие слагаемые уравнения (1); цветовая шкала показывает номер доминирующего слагаемого

При сравнении топографического фактора (3-е слагаемое) с  $\beta$ -эффектом (1-е слагаемое) выделяются небольшие области, где топографический фактор и  $\beta$ -эффект сопоставимы, что говорит о возможности вихрей в этой части пересекать жёлоб. Для большей же части акватории (кроме глубоководной зоны Берингова моря) топографический фактор (3-е слагаемое) на порядок превосходит 1-е слагаемое вследствие значительной неоднородности рельефа морского дна в рассматриваемом регионе. Совместный вклад топографии и течения (4-е слагаемое), вероятно, в незначительной степени влияет на распространение мезомасштабных вихрей региона: вклад 4-го слагаемого в «эффективный»  $\beta$ -эффект лишь в небольших районах превосходит вклад 1-го слагаемого. Однако выделяется район к югу от Алеутской гряды между  $171\text{--}176^\circ$  в. д., где наблюдается ослабевание совместного действия течения и топографии. В этой части антициклонические вихри «отрываются» от течения и топографии (видно из *рис. 2в*) и следуют на юго-запад.

### Сравнение параметров антициклонических и циклонических вихрей

Рассмотрим средние параметры мезомасштабных вихрей, сформированных у Алеутских о-вов (маска района представлена на *рис. 2*). Из *табл. 1* видно, что за рассмотренный период с 1993 по 2021 г. антициклонических вихрей сформировалось значительно больше, чем циклонических.

По абсолютному количеству антициклонов насчитывается 3969, а циклонов — 2564. Более того, антициклонические вихри обладают большей продолжительностью жизни, амплитудой и орбитальной скоростью. Так, в среднем антициклоны существуют на 4 сут дольше: 46 сут — антициклоны и 42 сут — циклоны. Стоит отметить, что средние параметры хоть и отображают общую закономерность, но не являются столь информативными, поскольку продолжительность жизни антициклонических вихрей в отдельных случаях может превосходить аналогичный параметр для циклонических на несколько месяцев и более. Средняя амплитуда антициклонических вихрей (3,48 см) на 1 см превосходит среднюю амплитуду циклонических вихрей (2,57 см), однако для отдельных вихрей эта разница может достигать нескольких десятков сантиметров. Средняя орбитальная скорость антициклонов оценивается в 14 см/с, а циклонов — в 10 см/с. Радиус и перемещение мезомасштабных вихрей различаются незначительно: для антициклонов они составляют 39 и 58 км, а для циклонов — 40 и 57 км.

*Таблица 1.* Средние параметры мезомасштабных вихрей в районе исследования по данным массива МЕТА3.2 DT за период 1993–2021 гг.

	Антициклоны	Циклоны
Количество, шт.	3969	2564
Продолжительность жизни, сут	$46 \pm 95$	$42 \pm 78$
Амплитуда, см	$3,48 \pm 2,39$	$2,57 \pm 1,38$
Радиус, км	$39,05 \pm 9,75$	$40,60 \pm 10,20$
Орбитальная скорость, см/с	$14,12 \pm 5,57$	$10,50 \pm 3,67$
Перемещение, км	$58,43 \pm 91,40$	$57,00 \pm 82,37$

### Меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока как причина отрыва вихрей от жёлоба

Анализ траекторий антициклонических вихрей, преодолевших более 300 км от момента зарождения, показывает, что большинство из них пересекают цепь подводных гор Императорского хребта и лишь часть достигает Курило-Камчатского жёлоба (*рис. 5*, см. с. 218). Для рассмотрения были выбраны два отдельных вихря, характеризующие наи-

более типичные для долгоживущих антициклонических вихрей траектории. Антициклонический вихрь с порядковым номером 154217 был сформирован между островами Ближние и Крысьи в районе  $52^\circ$  с. ш.,  $175,5^\circ$  в. д. После зарождения он пересекает линию жёлоба в районе  $175^\circ$  в. д., следуя на юго-запад в соответствии с направлением течения на поверхности, преодолевает цепь подводных гор Императорского хребта у  $50^\circ$  с. ш.,  $167,7^\circ$  в. д. и диссипирует к западу от них у  $49,5^\circ$  с. ш.,  $162,5^\circ$  в. д.

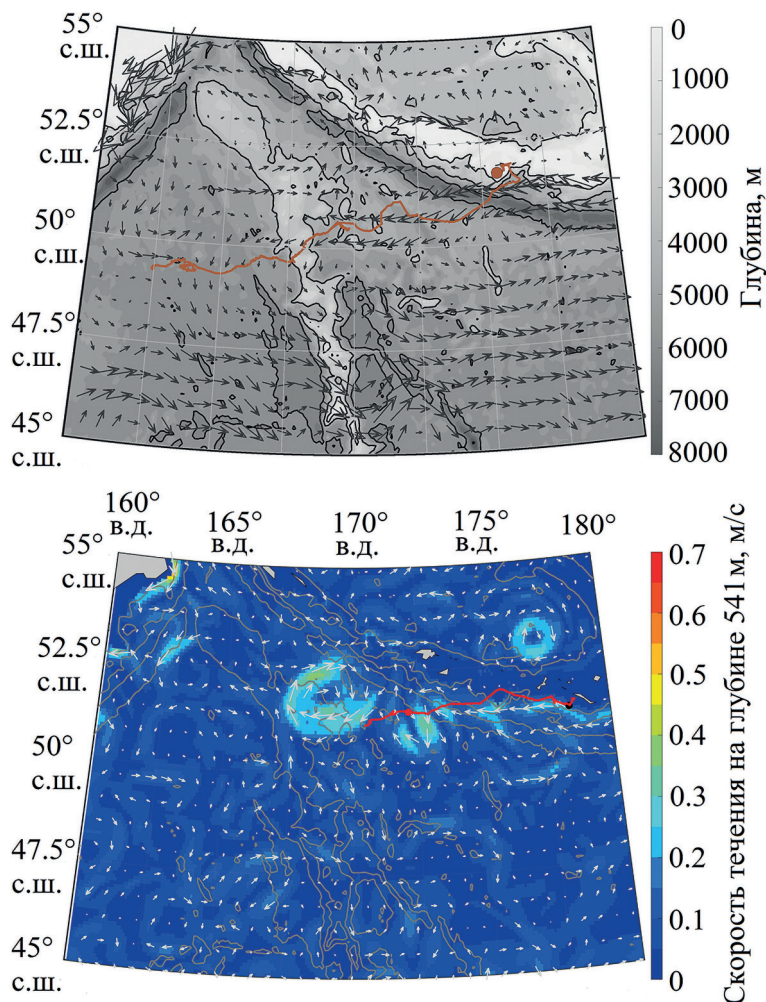


Рис. 5. Траектории отдельных долгоживущих антициклонических вихрей, преодолевших расстояние более 300 км от дня формирования. Красными линиями нанесены траектории вихрей по данным МЕТА3.2 DT. Вихрь 154217 (а); красной точкой отмечено место генерации, чёрными линиями отображены изобаты, градации серого и цветовая шкала показывают глубину, чёрными стрелками нанесены скорости течения на поверхности по данным GLORYS12V1. Вихрь 1991 (б); чёрной точкой отмечено место генерации, красной точкой — положение вихря в рассматриваемый день, серыми линиями отображены изобаты, серыми стрелками — скорость течения; цветовая шкала показывает величину скорости течения на горизонте 541 м по данным GLORYS12V1

Вихрь с порядковым номером 19917 сформировался восточнее — в районе  $52^\circ$  с. ш.,  $178^\circ$  в. д., к югу от о. Амчитка (Крысьи о-ва, см. рис. 1). Вихрь описывает похожую траекторию: после зарождения дрейфует на запад по направлению течения на глубине 541 м, пересекает Алеутский жёлоб и диссипирует в районе  $51,5^\circ$  с. ш.,  $171^\circ$  в. д. Контур вихря в рассматриваемый день (положение центра вихря отмечено красной точкой на рис. 5б) виден в поле скоростей, на периферии его скорость достигает  $0,3\text{--}0,45$  м/с, в то время как скорость течения на глубине 541 м для остальной части акватории не превышает  $0,1\text{--}0,2$  м/с.



Таблица 2. Слагаемые «эффективного»  $\beta$ -эффекта в точках для двух антициклонических вихрей. Рассчитаны по суточным значениям зональной компоненты скорости на глубине 541 м по данным GLORYS12V1. Значения нормированы на  $10^{-10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

Номер вихря, дата	Координаты	1-е ( $\beta \cos \theta$ )	2-е ( $U_{yy}$ )	3-е ( $fH_y/H$ )	4-е ( $U_y H_y/H$ )
143131, 28.01.1998	52,11° с. ш., 171,06° в. д.,	0,09	1,36	-1,10	-0,05
27982, 05.02.1994	51,96° с. ш., 173,30° в. д.,	0,09	1,66	-1,02	0,10

В табл. 2 представлены слагаемые «эффективного»  $\beta$ -эффекта для двух долгоживущих антициклонических вихрей. Были использованы суточные значения зональной компоненты скорости потока на горизонте 541 м, поскольку примерно на этой глубине располагается середина ядра вихря. Согласно расчётам, наибольший вклад в перемещение вихрей вносит меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока, он превосходит 1-е и 4-е слагаемые на два порядка, а по значению превалирует над топографическим фактором (3-е слагаемое). Так, меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока в точке для вихря 143131 равен  $1,36 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , а топографический фактор составляет  $-1,10 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Для вихря с порядковым номером 27982 отмечается ещё большая разница между меридиональным градиентом зонального сдвига скорости потока и топографическим фактором: 1,66 и  $-1,02 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Наименьший же вклад вносят  $\beta$ -эффект и совместное действие течения и топографии, их значения для обоих вихрей варьируются в пределах  $-(0,05-0,10) \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

## Выводы

В работе были рассмотрены факторы, влияющие на распространение мезомасштабных вихрей в районе Алеутского жёлоба:  $\beta$ -эффект, меридиональный градиент зонального сдвига скорости потока, топографический фактор и совместное действие течения и топографии. Сравнение данных механизмов показывает, что, несмотря на существенный вклад топографии, для отдельных дней наблюдается доминирование 2-го слагаемого. Это означает, что отрыв вихрей от жёлоба происходит под действием сдвигового потока. Этот эффект, когда вихри отрываются от жёлоба, наблюдается в определённые моменты времени, в то время как для средних значений скорости течения, рассчитанных за период с 1993 по 2021 г., топографический фактор превосходит остальные слагаемые на несколько порядков для большей части рассматриваемой акватории. Распространение мезомасштабных вихрей после отрыва от жёлоба определяется преимущественно западным направлением, а в отдельных случаях — юго-западным.

Траектории перемещения циклонов и антициклонов в рассматриваемом районе различны: если антициклоны распространяются в западном направлении вдоль шельфовой зоны (с глубинами 1–2 км) южнее Алеутской гряды, то циклоны распространяются преимущественно вдоль Алеутского жёлоба (глубины 5–7 км).

Установлено, что антициклонических вихрей в районе Алеутской гряды формируется больше, чем циклонических, и максимальное количество антициклонических вихрей на ячейку  $0,25^\circ$  по широте и  $0,5^\circ$  по долготе наблюдается к югу от островов Ближние и Крысьи. Генерация циклонических вихрей происходит менее активно, максимальное число генераций наблюдается к востоку от о. Агатту (Ближние о-ва). Сравнение средних параметров антициклонических и циклонических вихрей показывает, что антициклоны превосходят циклоны по продолжительности жизни, амплитуде и орбитальной скорости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00004.

## Литература

1. Андреев А. Г. Алеутские вихри и их влияние на температуру вод и концентрацию растворенного кислорода в западной части тихоокеанской Субарктики // *Океанол. исслед.* 2020. Т. 48. № 3. С. 109–122. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).7.
2. Белоненко Т. В., Кубряков А. А. Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в Северной части Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2014. Т. 11. № 3. С. 9–18.
3. Гневывшев В. Г., Фролова А. В., Кубряков А. А. и др. Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для Антарктического циркумполярного течения // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55. № 5. С. 39–50. DOI: 10.31857/S0002-35155539-50.
4. Гневывшев В. Г., Фролова А. В., Колдунов А. В., Белоненко Т. В. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // *Фундам. и приклад. гидрофизика.* 2021. Т. 14. № 1. С. 4–14. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
5. Пранц С. В. Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана.* 2021. Т. 57. № 4. С. 387–400. DOI: 10.31857/S0002351521040106.
6. Травкин В. С., Белоненко Т. В., Кочнев А. В. Топографические волны в Курильском районе // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2022. Т. 19. № 5. С. 222–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234.
7. Budyansky M. V., Prants S. V., Uleysky M. Yu. Odyssey of Aleutian eddies // *Ocean Dynamics.* 2022. V. 72. No. 6. P. 455–476. DOI: 10.1007/s10236-022-01508-w.
8. Chelton D. B., DeSzoeke R. A., Schlax M. G. et al. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation // *J. Physical Oceanography.* 1998. V. 28. No. 3. P. 433–460. DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2.
9. 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.
10. Gnevyshev V. V., Frolova A. V., Belonenko T. V. Topographic Effect for Rossby Waves on Non-Zonal Shear Flow // *Water Resources.* 2022. V. 49. No. 2. P. 240–248. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
11. Mysak L. A., LeBlond P. H. *Waves in the Ocean.* Elsevier, 1978. 602 p. DOI: 10.1017/S002211207923228X.
12. Okkonen S. R. The shedding of an anticyclonic eddy from the Alaskan Stream as observed by the Geosat altimeter // *Geophysical Research Letters.* 1992. V. 19. No. 24. P. 2397–2400.
13. Saito R., Yasuda I., Komatsu K. et al., Subsurface hydrographic structures and the temporal variations of Aleutian eddies // *Ocean Dynamics.* 2016. V. 66. No. 5. P. 605–621. DOI: 10.1007/s10236-016-0936-0.
14. Ueno H., Freeland H. J., Crawford W. R. et al. Anticyclonic eddies in the Alaskan Stream // *J. Physical Oceanography.* 2009. V. 39. No. 4. P. 934–951. DOI: 10.1175/2008JPO3948.1.
15. Ueno H., Crawford W. R., Onishi H. Impact of Alaskan Stream eddies on chlorophyll distribution in the North Pacific // *J. Oceanography.* 2010. V. 66. No. 3. P. 319–328. DOI: 10.1007/s10872-010-0028-6.

## Mesoscale eddies of the Aleutian Trench

S. P. Khudyakova<sup>1</sup>, V. S. Travkin<sup>1,2</sup>, T. V. Belonenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia  
E-mail: khydyakova.s@gmail.com

<sup>2</sup> N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow 119034, Russia

The study investigates the trajectories of mesoscale anticyclonic and cyclonic vortices south of the Aleutian Ridge at areas with different bottom topography. It is demonstrated that anticyclonic vortices propagate along the Aleutian Islands' shelf zone, while cyclonic vortices' trajectories are located further south — along the Aleutian Trench at depths of 5–7 km. Estimates of the quantity of mesoscale vortices and their generation per a  $0.25 \times 0.5^\circ$  grid cell (in latitude and longitude, respectively) were obtained. It was established that anticyclones dominate in the studied area, with the maximum number observed south of Near and Rat Islands. The physical mechanisms influencing the propagation of me-

mesoscale vortices in the region were analyzed. A comparative analysis of the contributions to the dispersion equation for barotropic topographic Rossby waves was conducted, including the  $\beta$ -effect, meridional gradient of zonal flow, topographic factor, and the combined effect of currents and topography. Calculations based on mean values of the zonal component of velocity reveal the predominance of the topographic factor over most of the water area. However, for certain days, the meridional gradient of zonal flow prevails over the other components. It was shown that vortices detach from the trench under the influence of currents in the region of 171–176° E longitude.

**Keywords:** mesoscale eddies, satellite altimetry, Aleutian Trench, META3.2 DT, GLORYS12V1

Accepted: 20.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-211-221

## References

1. Andreev A.G., Aleutian eddies and their impact on temperature and dissolved oxygen in the Western Subarctic Pacific, *J. Oceanological Research*, 2020, Vol. 48, No. 3, pp. 109–122 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).7.
2. Belonenko T.V., Kubryakov A.A., Temporal variability of the phase velocity of Rossby waves in the North Pacific, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 9–18 (in Russian).
3. Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A. et al., Interaction of Rossby waves with a jet stream: basic equations and their verification for the Antarctic circumpolar current, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 412–422, DOI: 10.1134/S0001433819050074.
4. Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Koldunov A.V., Belonenko T.V., Topographic Effect for Rossby Waves on a Zonal Shear Flow, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 4–14, DOI: 10.7868/S2073667321010019.
5. Prants S.V., Trench Eddies in the Northwest Pacific: An Overview, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, pp. 341–353, DOI: 10.1134/S0001433821040216.
6. Travkin V.S., Belonenko T.V., Kochnev A.V., Topographic waves in the Kuril region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 222–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234.
7. Budyansky M.V., Prants S.V., Uleysky M. Yu., Odyssey of Aleutian eddies, *Ocean Dynamics*, 2022, Vol. 72, No. 6, pp. 455–476, DOI: 10.1007/s10236-022-01508-w.
8. Chelton D.B., DeSzoeke R.A., Schlax M.G. et al., Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation, *J. Physical Oceanography*, 1998, Vol. 28, No. 3, pp. 433–460, DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2.
9. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, No. 2, pp. 167–216, DOI: 10.1016/j.pocan.2011.01.002.
10. Gnevyshev V.V., Frolova A.V., Belonenko T.V., Topographic Effect for Rossby Waves on Non-Zonal Shear Flow, *Water Resources*, 2022, Vol. 49, No. 2, pp. 240–248, DOI: 10.1134/S0097807822020063.
11. Mysak L.A., LeBlond P.H., *Waves in the Ocean*, Elsevier, 1978, 602 p., DOI: 10.1017/S002211207923228X.
12. Okkonen S.R., The shedding of an anticyclonic eddy from the Alaskan Stream as observed by the Geosat altimeter, *Geophysical Research Letters*, 1992, Vol. 19, No. 24, pp. 2397–2400.
13. Saito R., Yasuda I., Komatsu K. et al., Subsurface hydrographic structures and the temporal variations of Aleutian eddies, *Ocean Dynamics*, 2016, Vol. 66, No. 5, pp. 605–621, DOI: 10.1007/s10236-016-0936-0.
14. Ueno H., Freeland H.J., Crawford W.R. et al., Anticyclonic eddies in the Alaskan Stream, *J. Physical Oceanography*, 2009, Vol. 39, No. 4, pp. 934–951, DOI: 10.1175/2008JPO3948.1.
15. Ueno H., Crawford W.R., Onishi H., Impact of Alaskan Stream eddies on chlorophyll distribution in the North Pacific, *J. Oceanography*, 2010, Vol. 66, No. 3, pp. 319–328, DOI: 10.1007/s10872-010-0028-6.