

## Топографические волны в Курильском районе

В. С. Травкин<sup>1</sup>, Т. В. Белоненко<sup>1</sup>, А. В. Кочнев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: [btvlisab@yandex.ru](mailto:btvlisab@yandex.ru)

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова  
Архангельск, 163002, Россия

Анализируются различные типы топографических волн в Курильском районе. Рассматриваются следующие топографические структуры: шельф, глубоководный жёлоб и топографическое поднятие мористее жёлоба. Показано, что волны на топографических склонах проявляются в виде упорядоченного перемещения мезомасштабных вихрей. На шельфе антициклоны перемещаются на юго-запад в виде шельфовых волн, а на мористой стороне жёлоба — в виде желобовых волн, распространяющихся на северо-восток. На внутренней стороне жёлоба и на склоне топографического поднятия за жёлобом топографические волны проявляются преимущественно в виде перемещающихся на юго-запад циклонов. Сравнение различных факторов, влияющих на распространение низкочастотных волн, показало, что вклад топографии является доминирующим, на несколько порядков превышающим вклад  $\beta$ -эффекта и сдвиговых течений. Топографические волны имеют баротропную составляющую, проявляющуюся в упорядоченном перемещении вихрей вдоль изобат, расположенных на глубинах ниже 5000 м.

**Ключевые слова:** Курильский район, Курильский жёлоб, топографические волны, шельфовые волны, желобовые волны, мезомасштабные вихри

Одобрена к печати: 30.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234

### Введение

Топографические волны Россби образуются в районах, где значительны крупномасштабные топографические изменения морского дна. В Мировом океане низкочастотные волны этих типов могут проявляться в виде перемещающихся мезомасштабных вихрей, пространственный размер которых лежит в диапазоне от нескольких десятков до первых сотен километров, а период волн — от нескольких суток до нескольких лет. Для эмпирического изучения топографических волн активно используют натурные измерения, данные океанических моделей и реанализов, а также спутниковые наблюдения. Топографические волны принадлежат к типу захваченных волн, так как их энергия локализуется (захватывается) в областях с крупномасштабными изменениями донной топографии, а вне их затухает. Топографические волны оказывают существенное воздействие на энерго- и массообмен Мирового океана, короткопериодные колебания климата, апвеллинг и биопродуктивность прибрежных акваторий (Ефимов и др., 1985; Ле Блон, Майсек, 1981).

Предмет настоящего исследования — низкочастотные волны в области Курильского шельфа и Курильского жёлоба. Курильский район характеризуется повышенной синоптической активностью вихрей, чему способствуют уникальные динамические условия. Здесь происходит сложное динамическое взаимодействие двух крупномасштабных течений: холодного Ойясио с тёплыми рингами Куроисио, а изменчивость океанологических параметров наблюдается в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. В области Курильской гряды упорядоченное перемещение мезомасштабных вихрей может рассматриваться как несколько систем низкочастотных топографических волн, одна из которых распространяется вдоль шельфа в юго-западном направлении и представлена шельфовыми волнами (Белоненко, 2012; Ефимов и др., 1985), а другие характеризуются волнами, распространяющимися по склонам Курильского жёлоба, а также вдоль топографической неоднородности, расположенной мористее жёлоба. В работах (Ефимов, Рабинович, 1980; Ефимов и др., 1985;

Rabinovich, Thomson, 2001; Rabinovich et al., 2002) отмечается, что волны в Курильском жёлобе — желобовые волны — распространяются на северо-восток вдоль Курильского жёлоба и оказывают существенное воздействие на формирование синоптических колебаний и суточных приливов в регионе. По данным спутниковых наблюдений (Булатов, Лобанов, 1983), эти волны формируют устойчивую систему перемещающихся вихрей, представленных квазистационарными образованиями со скоростями порядка 2–6 см/с, движущимися в северо-восточном направлении вдоль оси жёлоба. С. С. Лаппо (1979), а также В. В. Ефимов с коллегами (1985) отмечают, что вихри в районе жёлоба формируются за счёт динамического воздействия атмосферы на океаническую поверхность и имеют резонансную природу. С. В. Пранц (2021) указывает, что эти вихри формируются в результате баротропной и бароклинной неустойчивости Ойясио в холодный период года, когда оно усиливается и значительно меандрирует. В работе (Самко и др., 2007) рассматриваются мезомасштабные вихри различного происхождения, включая и квазистационарные вихри, которые сформированы за счёт баротропной и бароклинной неустойчивости Куроисио. Таким образом, генерация вихрей, перемещающихся в Курильском районе, может быть различной.

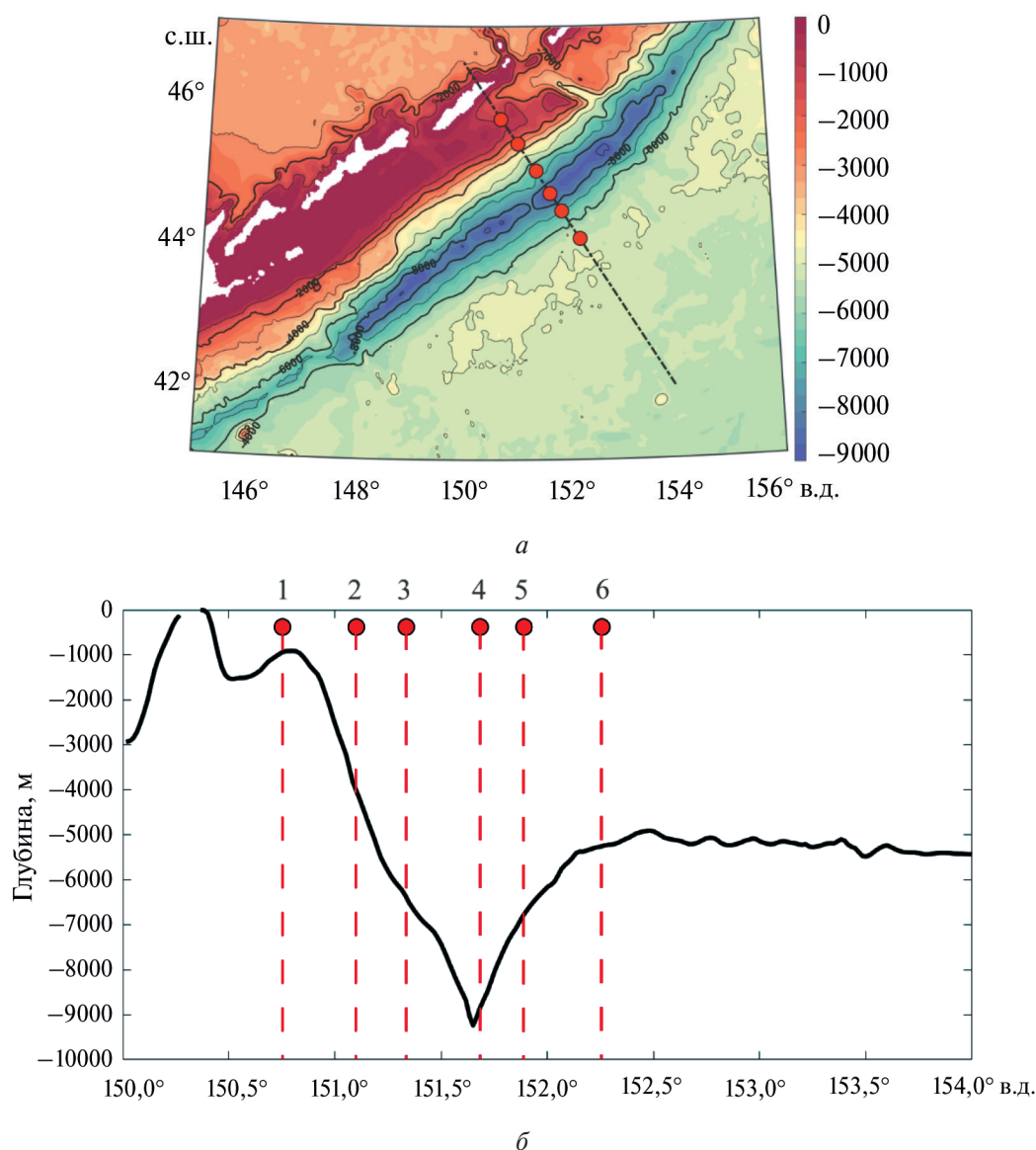


Рис. 1. Батиметрическая карта Курильского жёлоба по данным ETOPO1, чёрным пунктиром показан поперечный разрез (а); топографический профиль вдоль разреза (б). Красным цветом показаны пункты, в которых рассчитывались слагаемые обобщённого  $\beta$ -эффекта

На *рис. 1* (см. с. 223), где представлена донная топография Курильского района, видно, что особенности рельефа характеризуются областями шельфа, глубоководного жёлоба и не-большого топографического поднятия за жёлобом. Область шельфа резко переходит в континентальный склон, образующий внутреннюю часть жёлоба. Внешний, океанический, склон жёлоба имеет меньшую изменчивость по глубине. В дальнейшем будем рассматривать особенности волновой динамики для следующих четырёх зон Курильского района, обладающих различными свойствами: 1) шельф, где глубина океана увеличивается; 2) континентальный склон — внутренняя часть жёлоба, где глубина увеличивается; 3) внешняя, океаническая, часть жёлоба, где глубина океана уменьшается, а производная функции, описывающей глубину, меняет знак; 4) открытый океан, где к востоку от жёлоба наблюдается вытянутое в направлении параллельно жёлобу топографическое поднятие, к западу от поднятия глубина уменьшается, а с восточной стороны — увеличивается. Далее к востоку глубина океана меняется незначительно, можно считать, что она постоянна.

На шельфе перемещающаяся система вихрей образует шельфовые волны, которые распространяются по шельфу, оставляя берег справа (см. также работы (Белоненко и др., 2018; Сандалюк и др., 2020)); в жёлобе перемещение неоднородностей в поле уровня связывают с желобовыми волнами (Ефимов и др., 1985; Ле Блон, Майсек, 1981). В первом случае шельф служит волноводом для шельфовых волн, в результате чего энергия переносится на большие расстояния без её потери; во втором случае волноводом является жёлоб.

Исследование шельфовых волн началось с работы (Buchwald, Adams, 1968). Изучение желобовых волн стартует с пионерской работы Л. А. Майсека с коллегами (Mysak et al., 1979), которые и ввели термин «желобовые волны» (*англ.* trench waves). Отметим, что в некоторых исследованиях рассматриваются желобовые волны как аналог двойных волн Кельвина (см., например, работу (Ефимов и др., 1985)). Однако в исследовании (Mysak et al., 1979) термин «двойные волны Кельвина» вообще не упоминается, а в монографии (Ле Блон, Майсек, 1981) указывается, что в море двойные волны Кельвина не обнаружены, хотя лабораторные эксперименты дают основания считать, что в отдельных случаях они могут существовать. Термин «двойные волны Кельвина» был введён в работах (Longuet-Higgins, 1968a, б). Эти волны являются предельным случаем желобовых волн при стремлении ширины жёлоба к нулю. В дальнейшем мы будем следовать терминологии (Mysak et al., 1979), называя волны, распространяющиеся вдоль жёлоба, желобовыми волнами.

В последние годы появилось множество новых цифровых продуктов, которые позволяют изучать волновые процессы в океане на основе эмпирического материала. Один из них — новый спутниковый продукт META3.2 DT, описание которого будет дано ниже. Анализ траекторий мезомасштабных вихрей Курильского района, являющихся проявлением топографических волн в регионе, лежит в основе данной работы. Таким образом, цель статьи состоит в изучении топографических волн в Курильском районе с привлечением спутниковых и модельных данных.

## Данные

### *Атлас траекторий мезомасштабных вихрей META3.2 DT*

В работе используются данные Атласа траекторий мезомасштабных вихрей, доступные на портале AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product/meta3-2-dt.html>). Массив основан на использовании альтиметрической информации (высоты поверхности моря) для идентификации и определения траекторий циклонов и антициклонов Мирового океана (Chelton et al., 2011). Алгоритм выделяет изолированные вихревые структуры на ежесуточных картах и в дальнейшем следит за ними, фиксируя их эволюцию во времени. Массив содержит информацию о типе вихрей, их радиусе и амплитуде, скорости вращения, продолжительности жизни. Кроме того, атлас даёт для каждого вихря свой идентификационный номер и координаты его траектории. Алгоритм

идентифицирует вихри как скопления пикселей (максимальный размер — 2000 пикселей), удовлетворяющие определённому набору критериев, таких как компактность, наличие экстремума аномалий уровня океана внутри вихревой структуры и т.д. Рассматривались данные за период с 01.01.1993 по 02.08.2021.

### GLORYS12V1

В работе мы используем данные по компонентам  $u$  и  $v$  скоростей течений за 1993–2019 гг. глобального океанического реанализа GLORYS12v1, доступного на портале системы Европейских центров морских прогнозов (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS, <http://marine.copernicus.eu>). GLORYS12v1 представляет собой вихреразрешающий реанализ, базирующийся на гидродинамической модели NEMO (англ. Neural Models). Атмосферный форсинг данной модели задаётся реанализом ERA-Interim. Спутниковые наблюдения, а также данные дрейфующих буев, морских глайдеров и измерения *in situ* ассимилируются в реанализ с использованием фильтра Калмана. Физические и ледовые характеристики реанализа GLORYS12v1 по вертикали имеют 50 горизонтов с шагом от 1 м вблизи поверхности до 453 м на последних горизонтах. Пространственное разрешение данных составляет  $1/12^\circ$  по широте и долготе. Рассматривались данные за 1993–2021 гг.

### ETOPO1

Для получения информации о рельефе морского дна мы используем обновлённую версию глобальной батиметрически-топографической цифровой модели поверхности Земли ETOPO1. В модели комбинируется топография земной поверхности и батиметрия океана, а её пространственное разрешение составляет  $1'$  по широте и долготе. Информация о рельефе морского дна основана на результатах натурных измерений Японского центра океанологических данных (англ. Japan Oceanographic Data Center — JODC), а также Средиземноморской научной комиссии (фр. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Méditerranée — CIESM), Каспийской экологической программы (англ. Caspian Environment Program — CEP) и Национального центра геофизических данных (англ. National Geophysical Data Center — NGDC), объединённых в единое целое. В дальнейшем результаты привязывались к пространственной сетке  $500 \times 500$  м.

## Результаты

### Сравнение слагаемых эффективного $\beta$ -эффекта

На топографические волны, распространяющиеся в Курильском районе вдоль топографических склонов (1–4), влияют различные факторы, включая сдвиговые течения и  $\beta$ -эффект. Продемонстрируем, что при этом топографический фактор является доминирующим и превышает вклад других факторов на несколько порядков. На *рис. 1* показана донная топография в исследуемом районе. Видно, что в центре жёлоба глубина превышает 9000 м, максимальная глубина — 9717 м. Угол, который составляет главная ось жёлоба с широтой, равен  $\theta = 49,35^\circ$ . На *рис. 2* (см. с. 226) видно, что в среднем скорости течений составляют 15–20 см/с, прослеживается тенденция к северо-восточному направлению векторов вдоль изобат. В юго-западной части рассматриваемой акватории, где расположен квазистационарный антициклонический вихрь (Самко и др., 2007), и частично на северо-востоке направление векторов характеризует вращательные движения в вихрях.

На первом этапе проводится сравнительная оценка слагаемых  $\beta^*$  — эффективного  $\beta$ -эффекта в Курильском жёлобе. Сравнение проводится по формуле (Гневышев и др., 2019, 2021; Gnevyshev et al., 2022):



$$\beta^* = \beta \cdot \cos\theta - U_{\eta\eta} - \frac{fH_{\eta}}{H} + \frac{U_{\eta}H_{\eta}}{H},$$

где  $U(\eta)$  — скорость фонового течения в продольном направлении (вдоль жёлоба);  $f$  — параметр Кориолиса;  $H$  — глубина. В табл. 1 даны оценки слагаемых  $\beta^*$ . Видно, что во всех пунктах топографический фактор  $(fH_{\eta})/H$  доминирует, значительно (на несколько порядков) превышая вклад остальных слагаемых. Это означает, что анализ волн в Курильском районе можно ограничить влиянием топографии и пренебречь вкладом остальных факторов.

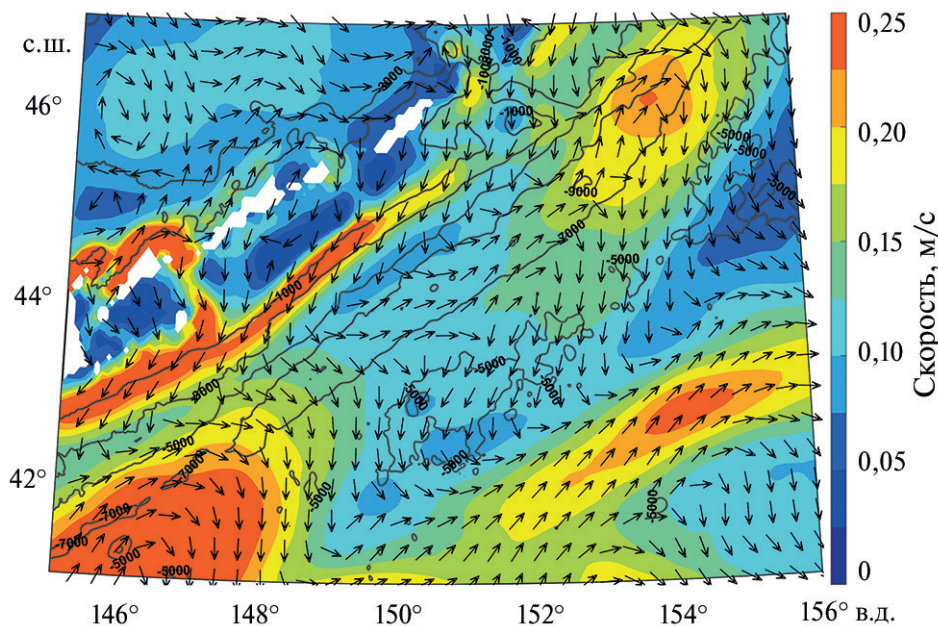


Рис. 2. Скорости течений на поверхности моря, осреднённые за 1993–2019 гг., по данным глобального океанического реанализа GLORYS12V1. Чёрными линиями показаны изобаты

Таблица 1. Оценки слагаемых  $\beta^*$  в пунктах 1–6 (см. рис. 1). Данные нормированы на  $10^{-11}$

Номер точки	Глубина (м)	$\beta \cdot \cos\theta$	$U_{\eta\eta}$	$(fH_{\eta})/H$	$(U_{\eta}H_{\eta})/H$
1	948	1,042	19,23	59,72	−0,63
2	3340	1,042	−9,36	−293,37	−5,98
3	6086	1,049	30,45	−111,66	0,44
4	9135	1,055	−1,72	−4,43	0,0042
5	6870	1,062	−3,58	89,73	0,64
6	5297	1,068	−1,24	20,30	−0,35

### Статистика и свойства вихрей в Курильском районе

На рис. 3 показана концентрация вихрей в рассматриваемом регионе. Циклоны и антициклоны, перемещающиеся в Курильском районе в течение 01.01.1993–02.08.2021, рассчитаны отдельно для каждой ячейки размером  $0,1^\circ$  по широте на  $0,2^\circ$  по долготе. В дальнейшем вихри были разделены на две группы в зависимости от продолжительности их жизни. Долгоживущими мы называем вихри с временем жизни более 10 сут. Выбор критерия обусловлен минимальным периодом повторяемости наблюдений нескольких спутников, несущих альтиметры. Дискретность данных альтиметрического продукта, равная 1 сут, является результатом интерполяции данных.

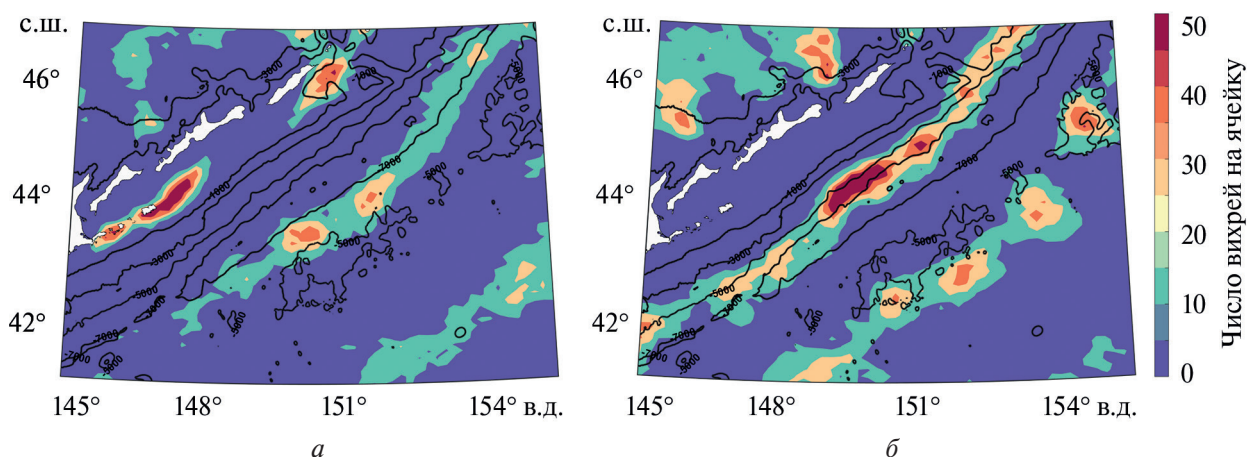


Рис. 3. Количество мезомасштабных вихрей на одну ячейку ( $0,1^\circ$  по широте на  $0,2^\circ$  по долготе) по данным Mesoscale eddy trajectory atlas product META2.0 DT за период с 01.01.1993 по 02.08.1021: *а* — антициклоны; *б* — циклоны. Чёрными линиями показаны изобаты

В табл. 2 даны основные параметры долгоживущих и короткоживущих циклонов и антициклонов. Видно, что количество циклонов значительно (более чем в два раза) превышает количество антициклонов, при этом антициклоны являются более устойчивыми образованиями по сравнению с циклонами, так как продолжительность их жизни  $t$  в среднем в два раза превышает продолжительность жизни циклонов. Возможно, причина большей устойчивости антициклонов кроется в так называемой циклон-антициклонной асимметрии, которая следует из нелинейных свойств вихрей: у циклона ротор скорости параллелен вектору вертикальной компоненты вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен. Это приводит к тому, что только у антициклона скалярная нелинейность уравнивает дисперсию, в то время как у циклона дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы (Незлин, 1986).

Таблица 2. Средние оценки параметров антициклонов (АЦ) и циклонов (Ц) в Курильском районе

Параметры	АЦ		Ц	
	$t < 10$ сут	$t > 10$ сут	$t < 10$ сут	$t > 10$ сут
Количество вихрей, ед.	66	209	131	422
Продолжительность жизни, дни	4	107	4	54
Амплитуда, см	1,98	17,07	1,74	4,40
Радиус, км	33,63	47,43	34,96	48,79
Площадь, км <sup>2</sup>	2874	6805	3170	7052
Орбитальная скорость, см/с	9,62	31,84	9,88	14,56
Скорость вихря, см/с	5,33	4,13	6,26	7,69

Средние радиусы циклонов и антициклонов и, соответственно, их площадь различаются незначительно. Однако амплитуды антициклонов почти в четыре раза превышают таковые для циклонов, а орбитальные скорости долгоживущих антициклонов более чем в два раза выше орбитальных скоростей циклонов. Это означает, что антициклоны в Курильском районе более интенсивны и имеют большую относительную и потенциальную завихренность. Средние скорости перемещения как циклонов, так и антициклонов составляют несколько сантиметров в секунду и для антициклонов они меньше, чем для циклонов.

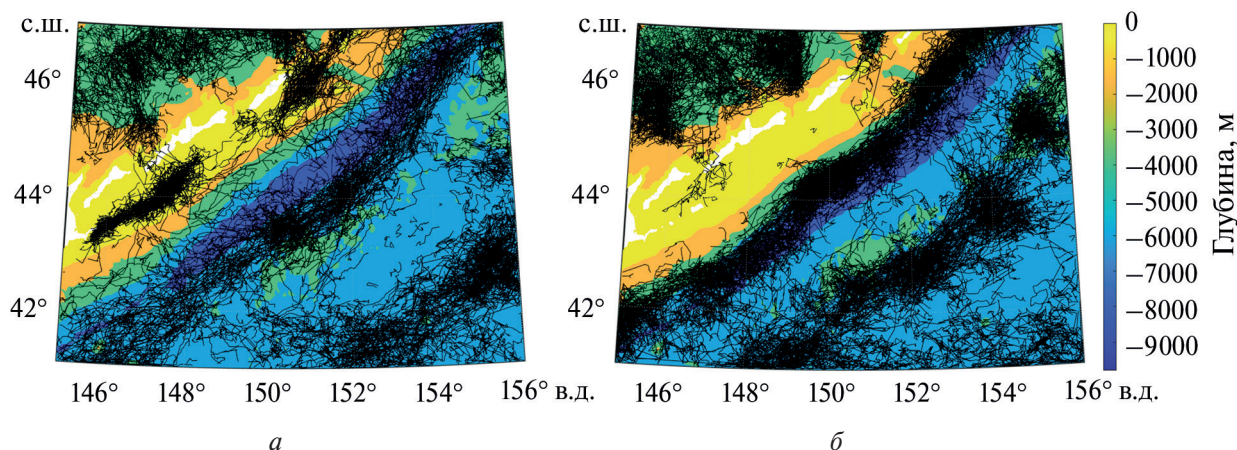
На рис. 3 видно, что в регионе распределение циклонов и антициклонов по площади неравномерно: антициклоны локализуются преимущественно на шельфе и на океанической



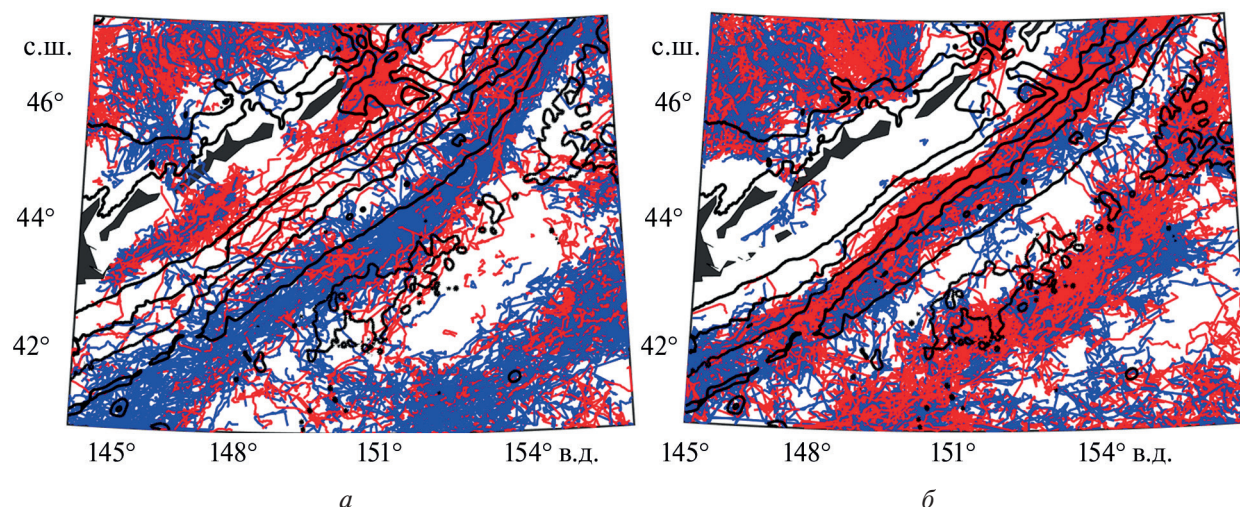
стороне жёлоба, в то время как траектории циклонов проходят по внутренней стороне жёлоба, а также рядом с океаническим поднятием за Курильским жёлобом, с океанической стороны.

В дальнейшем будем рассматривать вихри с жизненным циклом  $t > 10$  сут. На *рис. 4* показаны траектории этих вихрей. Можно отметить следующее: траектории циклонов и антициклонов идут по разным «дорожкам», практически параллельным друг другу. На *рис. 5* направление перемещения вихрей показано цветом: синим — направление на север, красным — на юг. Видно, что антициклоны и циклоны перемещаются не только по разным «дорожкам», но и в определённых направлениях. Антициклоны на Курильском шельфе (1) распространяются на юго-запад, антициклоны по океанической стороне жёлоба (3) — в основном на северо-восток, в то время как циклоны (по склонам 2 и 4) перемещаются преимущественно на юго-запад. Отметим, что во всех четырёх случаях они распространяются так, что мелкая вода (берег) остаётся справа. В работах (Гневышев и др., 2019, 2021; Gnevyshev et al., 2022) показано, что фазовая скорость распространяющихся топографических волн пропорциональна величине  $\alpha = H_\eta / H$ :

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{f\alpha}{k^2 + l^2}.$$

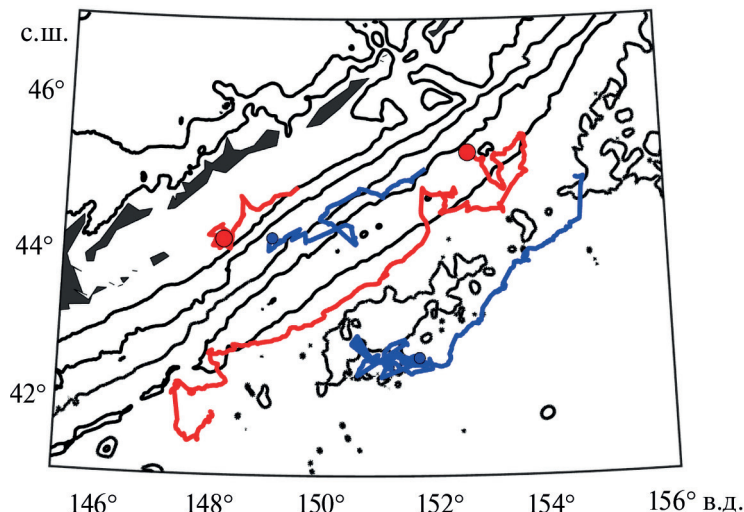


*Рис. 4.* Траектории долгоживущих вихрей в Курильском районе по данным Mesoscale eddy trajectory atlas product META2.0 DT за период с 01.01.1993 по 02.08.2021: *а* — антициклоны; *б* — циклоны



*Рис. 5.* Траектории антициклонов (*а*) и циклонов (*б*) по данным Mesoscale eddy trajectory atlas product META2.0 DT за период с 01.01.1993 по 02.08.2021. Синим цветом показаны треки вихрей на север, красным — на юг. Чёрными линиями показаны изобаты

Таким образом, в Курильском районе вихри разделяются на четыре группы; в каждой из них доминирует определённое направление: либо на северо-восток, либо на юго-запад; каждая группа представлена преимущественно определённым типом вихрей: либо циклоны, либо антициклоны. Данный факт ранее никем не отмечался. На *рис. 6* для наглядности показаны треки только для одного представителя из каждой группы.



*Рис. 6.* Отдельные треки циклонов (синий цвет) и антициклона (красный). Точками показаны места диссипации вихрей, чёрными линиями — изобаты

### **Вертикальная структура и скорости желобовых волн**

Обратим внимание на то, что перемещающиеся циклоны и антициклоны «чувствуют» изменение топографии на больших глубинах, т. е. они имеют выраженную баротропную составляющую. Рассмотрим, например, антициклон на океанической стороне Курильского жёлоба (*рис. 7*, см. с. 230); он перемещается на северо-восток. Центр этого антициклона приурочен к изобате 7000 м, перепад глубин на склоне наблюдается в диапазоне от 9000 до 5000 м (см. *рис. 1*). На *рис. 7* видно, что ядро антициклона расположено в слое до 1000 м. Однако динамический сигнал вихря, очевидно, прослеживается до дна, так как вихрь перемещается по изобате. Несмотря на то, что вихрь на мористой стороне жёлоба локализуется до 1000 м и, казалось бы, не зависит от изменений топографии, которые имеют место только на большой глубине (глубже 5000 м), вихрь «чувствует» топографический склон и перемещается вдоль изобаты. Это даёт основание утверждать, что вихрь существует не отдельно сам по себе, а является проявлением более крупномасштабного явления, в данном случае — желобовых волн, для которых характерна баротропная составляющая. Цепочки циклонов и антициклонов имеют организованную структуру и перемещаются в строго определённых направлениях вдоль изобат, хотя крупномасштабные топографические изменения расположены глубже 5000 м. Всё это приводит к тому, что в данном случае мы имеем дело не просто с проявлением мезомасштабных вихрей на треках, а с распространением топографических волн. Следуя работам (Ефимов и др., 1985; Ле Блон, Майсек, 1981) мы связываем распространение этих вихрей с топографическими волнами в Курильском районе. На *рис. 4–6* мы видим перемещение шельфовых волн, желобовых волн, которые ассоциируются с антициклонами, а также топографических волн на внутреннем склоне Курильского жёлоба и вдоль топографического поднятия за жёлобом. На *рис. 8* (см. с. 230) представлены двумерные спектры желобовых волн. Расчёт спектров проводился при помощи процедуры 2D-FFT, реализованной в среде Matlab. Видно, что эти волны имеют большие длины (более 500 км) и периоды, превышающие один год. Скорости волн изменяются в широком диапазоне: от нескольких сантиметров в секунду до нескольких десятков сантиметров в секунду.



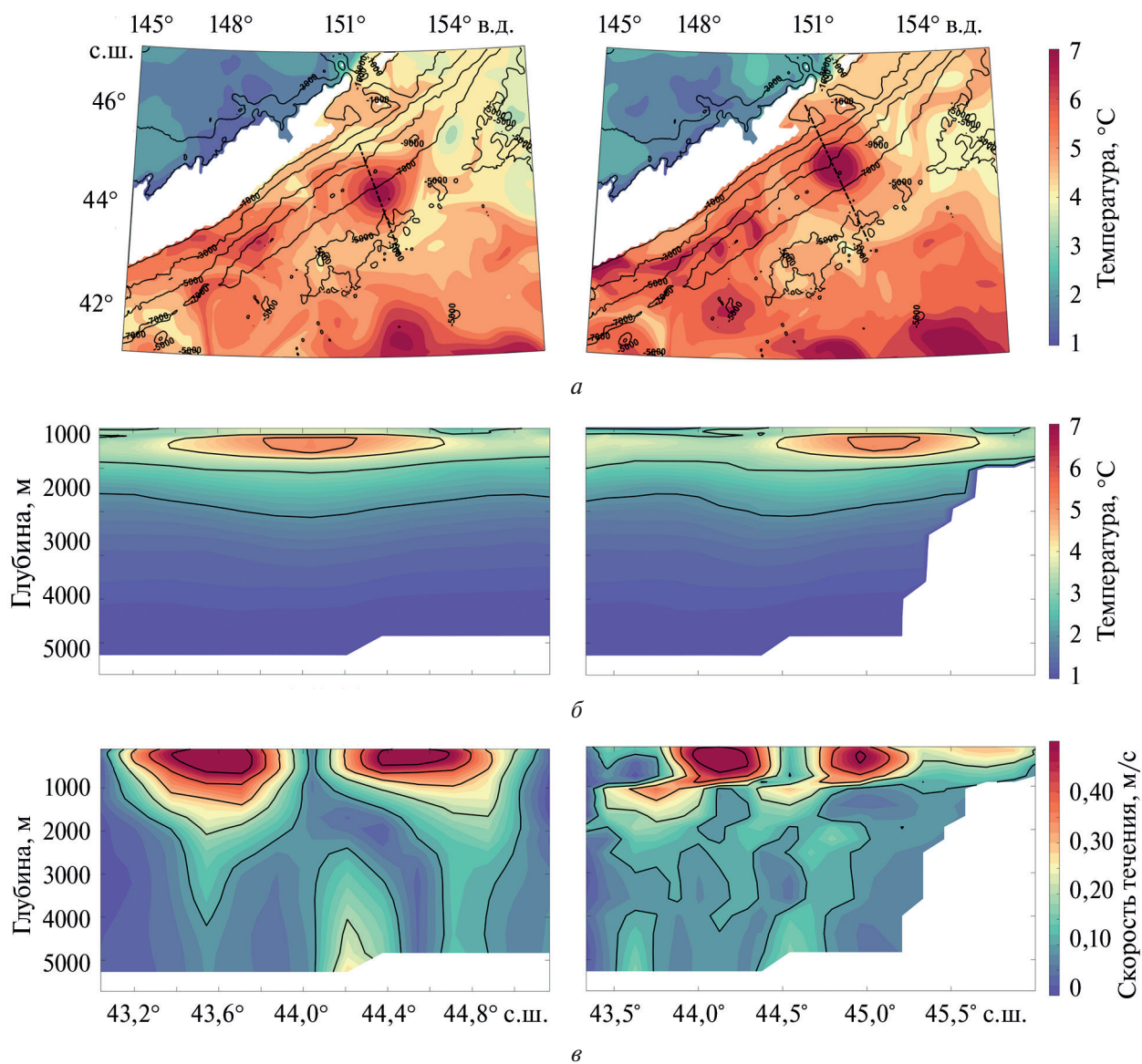


Рис. 7. Антициклонический вихрь в Курильском жёлобе в поле температуры (а), вертикальные разрезы температуры через центр вихря (б) и орбитальной скорости (в) за 1 июня (слева) и 1 июля (справа) 2019 г.

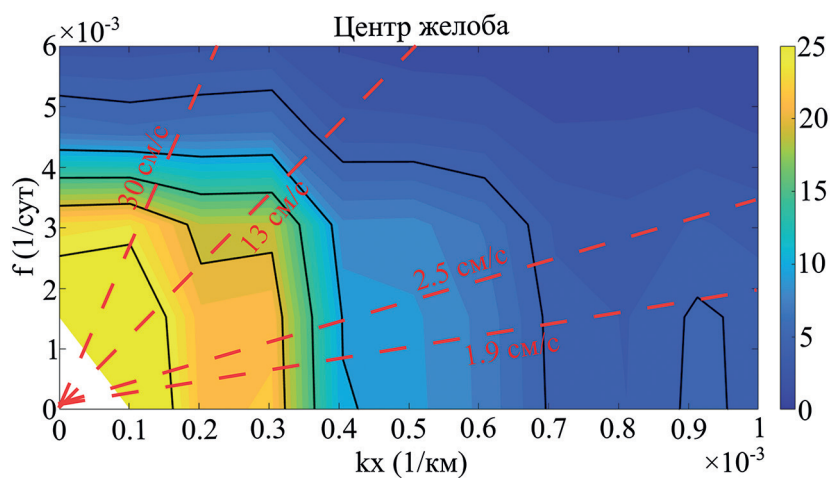


Рис. 8. Спектры 2D-FFT низкочастотных волн в Курильском районе. Пунктиром показаны фазовые скорости волн

## Обсуждение и выводы

Возможно, из-за того, что антициклоны имеют большие амплитуды и большие орбитальные скорости по сравнению с циклонами, в литературе в основном только их ассоциируют с топографическими волнами в Курильском районе: перемещение антициклонов на шельфе (1) связывают с шельфовыми волнами (Белоненко, 2012; Ефимов и др., 1985), а перемещение антициклонов на океанической стороне жёлоба (3) — с желобовыми (Ефимов и др., 1985). Однако, как мы видим на *рис. 3–6*, шельфовыми и желобовыми волнами не исчерпывается весь спектр топографических волн в Курильском районе. Ранее перемещение циклонов по внутренней стороне жёлоба (2) и мористее топографического поднятия за жёлобом (4) в литературе вообще не обсуждалось. Циклонам, число которых, как показала статистика, вдвое превышает число антициклонов, вообще не уделялось внимания, хотя, безусловно, они также вносят вклад в мезомасштабную динамику в Курильском жёлобе, что хорошо видно из *табл. 2* и *рис. 3–6*.

Возможно, циклоны исключались из поля зрения потому, что их амплитуда и орбитальные скорости гораздо меньше, чем у антициклонов, в результате чего последние лучше проявляются на спутниковых изображениях. Наблюдения на метеорологических спутниках фиксируют, как правило, цепочки только антициклонов, а циклоны практически на них не видны (Булатов, Лобанов, 1983). Пранц (2021) также рассматривает в качестве курильских вихрей только антициклоны. В данной работе мы хотим обратить внимание на то, что при описании топографических волн следует учитывать все вихри и все типы крупномасштабных топографических неоднородностей в Курильском районе, которые являются волноводами.

Таким образом, мы установили, что в Курильском районе наблюдается несколько систем топографических волн, перемещающихся вдоль изобат на крупномасштабных топографических склонах. Эти волны проявляются в виде цепочек мезомасштабных вихрей. Анализируя данные Атласа мезомасштабных вихрей (продукт META3.2 DT), мы установили четыре системы вихрей, каждая из которых распространяется по своему склону. Мы показали, что антициклоны распространяются по шельфу в виде шельфовых волн на юго-запад, а вдоль мористой стороны Курильского жёлоба — на северо-восток, в то время как циклоны — вдоль внутренней стороны жёлоба и вдоль топографического поднятия на юго-запад. Во всех случаях вихри распространяются так, что более мелкая вода остаётся справа.

Мы сравнили вклад различных слагаемых в  $\beta^*$  — эффективный  $\beta$ -эффект — и показали, что вклад топографии в распространении этих волн на несколько порядков превышает вклад других слагаемых. Мы установили, что среди долгоживущих вихрей (период жизни превышает 10 сут) доминируют циклоны: их число более чем в два раза превышает количество антициклонов. При этом антициклоны являются более устойчивыми образованиями и в среднем имеют в два раза большую продолжительность жизни, чем у циклонов, а также большую амплитуду и орбитальные скорости вихрей.

Несмотря на то что ядра вихрей локализованы в верхнем 1000-метровом слое, топографические волны в Курильском районе «чувствуют» топографический склон, расположенный глубже 5000 м, и распространяются преимущественно вдоль изобат. Этот факт свидетельствует о проявлении баротропной составляющей, характерной для волновой природы рассматриваемого явления. Длина этих волн превышает 500 км, а период — один год; скорость волн — от нескольких до нескольких десятков сантиметров в секунду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00004.

## Литература

1. Белоненко Т. В. Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 209–215.
2. Белоненко Т. В., Волков Д. Л., Колдунов А. В. Шельфовые волны в море Бофорта по данным гидродинамической модели MITgcm // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 854–863. DOI: 10.1134/S0030157418060023.
3. Булатов Н. В., Лобанов В. Б. Исследование мезомасштабных вихрей восточнее Курильских островов по данным метеорологических спутников Земли // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 3. С. 40–47.
4. Гневнышев В. Г., Фролова А. В., Кубряков А. А., Собко Ю. В., Белоненко Т. В. 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/S0002-351555539-50.
5. Гневнышев В. Г., Фролова А. В., Колдунов А. В., Белоненко Т. В. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // Фундам. и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 1. С. 4–14. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
6. Ефимов В. В., Рабинович А. Б. О резонансных приливных течениях и их связи с континентальными шельфовыми волнами в северо-западной части Тихого океана // Изв. Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 10. С. 1091–1101.
7. Ефимов В. В., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Файн И. В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 250 с.
8. Лаппо С. С. Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: Наука, 1979. 181 с.
9. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. В 2-х ч.: пер. с англ. Е. Н. Амбарцумян. М.: Мир, 1981. 960 с.
10. Незлин М. В. Солитоны Россби (Экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // Успехи физ. наук. 1986. Т. 150. № 1. С. 3–60. DOI: 10.3367/UFN.0150.198609a.0003.
11. 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.
12. Самко Е. В., Булатов Н. В., Капшутер А. В. Характеристики антициклонических вихрей различного происхождения и их влияние на промысел сайры и кальмара Бартрама юго-восточнее о. Хоккайдо // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 1. С. 357–369.
13. Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В., Колдунов А. В. Шельфовые волны в Большом Австралийском заливе по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 73–84. DOI: 10.31857/S0205961420050085.
14. Buchwald V. T., Adams J. K. The Propagation of Continental Shelf Waves // Proc. Royal Society of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sciences. 1968. V. 305. No. 1481. P. 235–250. DOI: 10.1098/rspa.1968.0115.
15. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. V. 91. P. 167–216. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
16. Gnevnyshchev 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: 10.1134/S0097807822020063.
17. Longuet-Higgins M. S. (1968a) On the trapping of waves along a discontinuity of depth in a rotating ocean // J. Fluid Mechanics. 1968. V. 31(3). P. 417–434. DOI: 10.1017/s0022112068000236.
18. Longuet-Higgins M. S. (1968b) Double Kelvin waves with continuous depth profiles // J. Fluid Mechanics. 1968. V. 34(01). P. 49–80. DOI: 10.1017/s002211206800176x.
19. Mysak L. A., Leblond P. H., Emery W. J. Trench Waves // J. Physical Oceanography. 1979. V. 9(5). P. 1001–1013. DOI: 10.1175/1520-0485(1979)009<1001:TW>2.0.CO;2.
20. Rabinovich A. B., Thomson R. E. Evidence of Diurnal Shelf Waves in Satellite-Tracked Drifter Trajectories off the Kuril Islands // J. Physical Oceanography. 2001. V. 31. P. 2650–2668. DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<265>.
21. Rabinovich A. B., Thomson R. E., Bograd S. J. Drifter Observations of Anticyclonic Eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands // J. Oceanography. 2002. V. 58. P. 661–671.



## Topographic waves in the Kuril region

V. S. Travkin<sup>1</sup>, T. V. Belonenko<sup>1</sup>, A. V. Kochnev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia  
E-mail: [btvlisab@yandex.ru](mailto:btvlisab@yandex.ru)

<sup>2</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov  
Arkhangelsk 163002, Russia

The paper analyzes various types of topographic waves in the Kuril region. The following topographic structures are considered: shelf, deep-water trench, and topographic elevation eastward of the trench. It is shown that waves on topographic slopes manifest themselves in the form of regular movement of mesoscale vortices. Anticyclones move to the southwest in the form of shelf waves along the shelf area, as well as in the form of trench waves spreading to the northeast on the sea side of the Kuril trench. On the inner side of the trench and the slope of the topographic elevation behind the trench, topographic waves appear mainly in the form of cyclones moving southwest. Comparison with different factors affecting the propagation of low-frequency waves showed that the contribution of topography is dominant, several orders of magnitude higher than the contribution of the  $\beta$ -effect and shear flow. Topographic waves have a barotropic component, manifested in the orderly movement of vortices along isobaths located at depths of more than 5000 m.

**Keywords:** Kuril region, Kuril trench, topographic waves, shelf waves, trench waves, mesoscale vortices

Accepted: 30.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234

### References

1. Belonenko T. V., Observations of Rossby waves in the northwestern Pacific, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 209–215 (in Russian).
2. Belonenko T. V., Volkov D. L., Koldunov A. V., Shelf waves in the Beaufort Sea in a high-resolution ocean model, *Oceanology*, 2018, Vol. 58, No. 6, pp. 778–785, <https://doi.org/10.1134/S0001437018060024>.
3. Bulatov N. V., Lobanov V. B., Investigation of mesoscale eddies to the east of the Kuril Islands on the base of meteorological satellites data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1983, No. 3, pp. 40–47 (in Russian).
4. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Belonenko T. V., Kubryakov A. A., Sobko Yu. V., Interaction between Rossby Waves and a Jet Flow: Basic Equations and Verification for the Antarctic Circumpolar Current, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55(5), pp. 412–422, DOI: 10.1134/S0001433819050074.
5. 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 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667321010019.
6. Efimov V. V., Rabinovich A. B., On resonant tidal currents and their connection with continental shelf waves in the northwestern Pacific Ocean, *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1980, Vol. 16, No. 10, pp. 1091–1101 (in Russian).
7. Efimov V. V., Kulikov E. A., Rabinovich A. B., Fine I. V., *Waves in the ocean boundary regions*, Leningrad, 1985, 250 p. (in Russian).
8. Lappo S. S., *Srednemashtabnye dinamicheskie protsessy okeana, vzbuzhdaemye atmosferoi* (Medium-scale dynamic processes of the ocean excited by the atmosphere), Moscow: Nauka, 1979, 181 p. (in Russian).
9. Le Blond P. H., Mysak L. A., *Waves in the ocean*, Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Scientific Publ. Company, 1978, 602 p.
10. Nezlin M. V., Rossby solitons (Experimental investigations and laboratory model of natural vortices of the Jovian Great Red Spot type), *Soviet Physics Uspekhi*, 1986, Vol. 29, pp. 807–842, DOI: 10.1070/PU1986v029n09ABEH003490.
11. Prants S. V., Trench Eddies in the Northwest Pacific: An Overview, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 341–353, DOI: 10.1134/S0001433821040216.
12. Samko E. V., Bulatov N. V., Kapshitar A. V., Characteristics of anticyclonic vortices of various origin and their influence on the fishing of saury and Bartram squid southeast of Hokkaido Island, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 1, pp. 357–369 (in Russian).

13. Sandalyuk N. V., Belonenko T. V., Koldunov A. V., Shelf Waves in the Great Australian Bight Based on Satellite Altimetry Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 9, pp. 1117–1126, <https://doi.org/10.1134/S0001433821090619>.
14. Buchwald V. T., Adams J. K., The Propagation of Continental Shelf Waves, *Proc. Royal Society of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1968, Vol. 305, No. 1481, pp. 235–250, DOI: 10.1098/rspa.1968.0115.
15. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, pp. 167–216, DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
16. 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.
17. Longuet-Higgins M. S. (1968a), On the trapping of waves along a discontinuity of depth in a rotating ocean, *J. Fluid Mechanics*, 1968, Vol. 31(3), pp. 417–434, DOI: 10.1017/s0022112068000236.
18. Longuet-Higgins M. S. (1968a), Double Kelvin waves with continuous depth profiles, *J. Fluid Mechanics*, 1968, Vol. 34(01), pp. 49–80, DOI: 10.1017/s002211206800176x.
19. Mysak L. A., Leblond P. H., Emery W. J., Trench Waves, *J. Physical Oceanography*, 1979, Vol. 9(5), pp. 1001–1013, DOI: 10.1175/1520-0485(1979)009<1001:TW>2.0.CO;2.
20. Rabinovich A. B., Thomson R. E., Evidence of Diurnal Shelf Waves in Satellite-Tracked Drifter Trajectories off the Kuril Islands, *J. Physical Oceanography*, 2001, Vol. 31, pp. 2650–2668, DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<2650>2.0.CO;2.
21. Rabinovich A. B., Thomson R. E., Bograd S. J., Drifter Observations of Anticyclonic Eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands, *J. Oceanography*, 2002, Vol. 58, pp. 661–671.