

## Влияние топографии на перемещение мезомасштабных вихрей на материковом склоне Новозеландского плато

Т. В. Белоненко<sup>1\*</sup>, В. С. Травкин<sup>1,2</sup>, В. Г. Гневыхшев<sup>3</sup>, А. В. Кочнев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

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

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

<sup>4</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, 163002, Россия

\*E-mail: [btvlisab@yandex.ru](mailto:btvlisab@yandex.ru)

### Аннотация

Рассматриваются мезомасштабные вихри на склоне Новозеландского плато. Основой исследования являются альтиметрические измерения за 1993-2022 гг. – абсолютная динамическая топография, а также продукт META3.2 (Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product), созданный на основе альтиметрических данных. Дополнительно используются данные глобального океанического реанализа GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis) за тот же период. Показано, что на склоне плато формируется струйное топографическое течение, которое проходит по склону Новозеландского плато узкой полосой. Скорости данного топографического течения достигают 70 см/с при осреднении за период 1993-2022 гг. Установлено, что генерация мезомасштабных вихрей преимущественно происходит на периферии топографического течения, при этом антициклоны образуются на северной (мелководной) периферии течения, а циклоны на южной (глубоководной). Рассмотрен разрез поперек склона и определены его части, на которых нормальные к разрезу составляющие скорости течения максимальны. Проанализированы траектории 1401 циклонов и 1488 антициклонов, выделенных за рассматриваемый период 1993-2022 гг., с продолжительностью жизни, превышающей 10 суток. Показано, что траектории циклонов и антициклонов управляются топографией: в большинстве случаев траектории циклонов и антициклонов имеют схожую форму и разнесены в пространстве.

**Ключевые слова:** Новозеландское плато, топография дна, склон, топографическое течение, мезомасштабные вихри, альтиметрия

### Введение

Вращение Земли оказывает значительное влияние на крупномасштабную циркуляцию океана, устанавливая строгие ограничения на её динамику. Поскольку горизонтальные масштабы десятки и сотни километров, а вертикальный масштаб ограничен глубиной океана пять километров, это означает, что в силу геометрических соотношений масштаб вертикальной скорости не превышает  $W = UH / L$  ( $U$  – масштаб горизонтальной скорости,  $H$  – глубина океана,  $L$  – горизонтальный масштаб движений) и что крупномасштабная циркуляция в океане преимущественно происходит в горизонтальных направлениях. Однако как показывает анализ (Монин и др., 1974; Rhines, 1977), реальные вертикальные скорости еще меньше и имеют порядок  $W = Ro U H / L$  в квазигеострофической теории ( $Ro$  – число Россби). Это означает, что крупномасштабная циркуляция в океане преимущественно происходит в горизонтальных направлениях. Топографические особенности дна оказывают направляющее воздействие на потоки, минимизируя их вертикальные смещения и способствуя развитию устойчивых

горизонтальных течений, которые определяют общую циркуляционную структуру региона (Salmon, 1998), при этом вертикальные движения управляются предпочтительным направлением циркуляции вдоль топографических контуров (изобат) (topographic steering) (Bower et al., 2002; Gille, 2003; Isachsen et al., 2003; LaCasce, 2000; Talley, 2011).

Влияние донной топографии на крупномасштабную циркуляцию зависит от формы топографических особенностей – будь то мыс, хребет, подводный каньон или просто неровная поверхность дна. Основными физическими факторами, управляющими мезомасштабными вихрями на материковом склоне, являются топография склона (его ориентация в пространстве и величина уклона), плотностная стратификация воды и бароклинная неустойчивость потоков. Сдвиговые течения, в зависимости от их направления и скорости, могут либо усиливать, либо ослаблять эти вихри, существенно влияя на их динамику. Немаловажным является также влияние бэ́та-параметра, который отражает изменение силы Кориолиса с широтой и влияет на перемещение вихрей. Внешнее атмосферное воздействие, такое как ветер и колебания атмосферного давления, играет важную роль в инициации и модификации вихрей на материковом склоне. Под действием всех перечисленных факторов океанические потоки могут взаимодействовать с топографией, вызывая образование волн и вихрей, а также создавая сильную турбулентность вблизи дна. Топографические особенности дна, такие как подводные хребты и впадины, могут не только выступать в роли генераторов внутренних волн, но и служить волноводами, направляя и рассеивая энергию волн, падающую на них (Гневывшев и др., 2021, 2023; Gnevyshev et al., 2022; Pedlosky, 1987).

Указанные выше эффекты особенно выражены в мезомасштабной циркуляции океана, где масштабы горизонтальных движений превышают бароклинный радиус деформации Россби (см., например, Gill, 1982; Hogg and Johns, 1995). Мезомасштабные вихри вносят значительный вклад в кинетическую энергию океана, составляя более 40% от общей кинетической энергии мезомасштабных движений. В некоторых регионах этот вклад может превышать 70% (Травкин и Белоненко, 2021; Chelton et al., 2011), что делает вихри важнейшими компонентами энергетического баланса океана. Мезомасштабные вихри не только аккумулируют энергию, но и передают её по спектру к более мелким масштабам. Одним из ключевых механизмов этого процесса является вытягивание вихрей в филаменты, которое способствует "перекачке" энергии из мезомасштабного уровня в субмезомасштабный. Этот процесс играет важную роль в каскадном переносе энергии, обеспечивая взаимодействие между различными масштабами движения в океане и влияя на общую динамику водных масс (Жмур и др., 2022, 2023 а,б; Arbic et al., 2012; Zhmur et al., 2023).

Влияние вращения Земли на крупномасштабную циркуляцию можно качественно рассмотреть с помощью закона сохранения баротропной потенциальной завихренности  $q = (f + \zeta) / H$ , где  $H$  – глубина океана,  $\zeta$  – баротропная относительная завихренность,  $f = 2\Omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса,  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  – широта. При соблюдении геострофического баланса для потока сохраняется баротропная потенциальная завихренность (Жмур и др., 2021; Stewart, 2008). В соответствии с законом ее сохранения, циркуляция на топографических склонах циклоническая, т.е. меньшая глубина (или берег) остается справа в северном полушарии и слева в южном (Pedlosky, 1987). Также установлено, что на мезомасштабе изменения глубины во многих случаях оказывают гораздо большее влияние, чем  $\beta$ -эффект (Гневывшев и др., 2021; Gnevyshev et al., 2022).

Теория бароклиной неустойчивости струйных латеральных течений при наличии топографии является предметом многих теоретических исследований (LaCasce et al., 2018, 2024, а также ссылки в этих статьях). Бароклиная вихревая изменчивость достигает максимума в океане вблизи сильных постоянных течений (Chelton et al., 2011; Poulin and Flierl, 2003). По некоторым оценкам величина потенциальной энергии крупномасштабных движений в океане примерно в 1000 раз превышает его кинетическую энергию (Gill et al., 1974; Ferrari and Wunsch, 2009; Smith, 2007). Вращающийся поток с вертикальным сдвигом скорости обычно ассоциируется с наклоном изопикн, что, в свою очередь, приводит к увеличению потенциальной энергии (Lorenz, 1955). В океане процесс превращения потенциальной энергии в вихревую кинетическую, проявляющийся во времени как изменяющаяся мезомасштабная циркуляция, называется бароклиной неустойчивостью. Наиболее ярко бароклиная неустойчивость будет проявляться на материковых склонах и иных крупномасштабных топографических неоднородностях дна, в результате чего генерируется множество мезомасштабных вихрей (Зацепин и Елкин, 2024; Charney, 1990; Eady, 1949; Phillips, 1951; Pedlosky, 1987). Данные, представленные в (Bower et al., 2009), показывают, что более крутые склоны характеризуются повышенным образованием вихрей по сравнению с менее крутыми (Isachsen, 2011; Trodahl and Isachsen, 2018). Установлено, что топография дна влияет на маршруты пограничных течений и траектории вихрей и низкочастотных волн (Belonenko et al., 2021), которые во многих случаях довольно строго следуют изобатам (Белоненко и др., 2018; Гневышев и др., 2021; Сандалюк и др., 2020; Gnevyshev et al., 2022). Однако топографический контроль часто нарушается при резком повороте изобат, и тогда течение распространяется, как свободная струя, что так же верно и для потока распространяющихся вихрей (Belonenko et al., 2021).

Мезомасштабные вихри различной полярности образуются часто на периферии течений, и это отмечали многие авторы. В работе (Худякова и др., 2023) показано, что антициклоны образуются на периферии Аляскинского течения с правой стороны по отношению к движению – в шельфовой зоне Алеутских островов, в то время как циклоны перемещаются в том же направлении по левой периферии течения – на бровке Алеутского желоба. В работе (Травкин и др., 2024) рассматриваются мезомасштабные вихри, распространяющиеся по изобатам вдоль топографического склона Новозеландского плато. Авторы обратили внимание на то, что вихри распространяются вдоль склона в виде двух систем: антициклоны преимущественно перемещаются на периферии течения слева, вдоль верхней границы материкового склона, а циклоны – справа.

В настоящей работе проводится анализ траекторий систем мезомасштабных вихрей по спутниковым и модельным данным на топографическом склоне Новозеландского плато, которое расположено в юго-западной части Тихого океана и примыкает к Новой Зеландии. Длина до 2000 км, ширина до 1000 км. Плато заканчивается крутым склоном. Целью предлагаемого исследования является анализ траекторий мезомасштабных вихрей, распространяющихся по склону Новозеландского плато. Исследование проводится на основе спутниковых и модельных данных.

## Данные

Используются данные **AVISO** (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) – измерения динамической топографии (ADT, Absolute Dynamic Topography), которые являются результатом объединения измерений всех альтиметрических миссий, включая спутники серии TOPEX/Poseidon и ERS, за период 1993 г. по настоящее время. Пространственное разрешение данных составляет  $0.25^\circ$  широты и долготы, временная дискретность – 1 сут. Последнее обновление массива включает в себя новые сенсорные и атмосферные поправки, новую калибровку различных высотометров,

новую модель приливов и учитывает более длительный базовый период в 20 лет для оценки для среднего уровня моря (Pujol et al., 2016). Аномалии уровня рассчитывались относительно данных среднего уровня моря (Mean Sea Surface, MSS), доступных на портале Aviso+ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mss.html>).

Используются данные **GLORYS12V1** (Global Ocean Physics Reanalysis), доступные на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), DOI (product): <https://doi.org/10.48670/moi-00021>. GLORYS12V1 представляет собой вихреразрешающий реанализ Мирового океана с пространственным разрешением  $1/12^\circ$  на 50 уровнях и охватывает период альтиметрических наблюдений, начиная с 1993 г. по . Реанализ основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS и гидродинамической модели циркуляции океана NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). В реанализе ассимилируются данные *in situ* спутниковых альтиметров (аномалии уровня моря), температуры поверхности моря, сплоченности морского льда, а также вертикальные профили температуры и солености. Наблюдения усваиваются с помощью фильтра Калмана низкого порядка.

Используется продукт «**Атлас альтиметрических мезомасштабных вихревых траекторий (МЕТА3.2 DT allsat)**», доступный по ссылке [<https://www.aviso.altimetry.fr/>]. Этот продукт основан на использовании альтиметрической информации (высоты поверхности моря) для идентификации и отслеживания траекторий циклонов и антициклонов в Мировом океане (Pegliasco et al., 2022). Алгоритм идентифицирует изолированные вихри на ежедневных картах и отслеживает их, фиксируя их эволюцию во времени. Вихри идентифицируются как скопления пикселей (максимальный размер 2000 пикселей), удовлетворяющих определенному набору критериев, таких как компактность и наличие внутри вихря экстремума аномалий уровня моря. Атлас присваивает каждому вихрю уникальный идентификационный номер и координаты его траектории. Продукт МЕТА3.2 содержит информацию о типе вихрей, их радиусе, амплитуде, орбитальной скорости и времени жизни.

Для описания рельефа дна используется глобальная цифровая модель рельефа **ETOPO2** (Earth Topography and Bathymetry), объединяющая данные о топографии, батиметрии и береговой линии из региональных и глобальных наборов данных высокого разрешения.

## Результаты

На *рисунке 1* видно, что Новозеландское плато представляет собой обширную подводную возвышенность на юго-западе от о. Новая Зеландия. Средние глубины непосредственно на плато составляют в среднем 500 м. Плато заканчивается крутым склоном с резким перепадом глубин от 500 до 5000 м. Ширина топографического склона составляет 120 км, на *рисунке 1* это пункты 50-60 вдоль разреза, пересекающего склон. Максимальный градиент глубины достигает значений 0,0375 (*рис. 2а*). Изопикны, построенные вдоль разреза (*рис. 2б*), на склоне (в пунктах 45-60) прогибаются вниз. Эта неоднородность в поле плотности вызывает бароклинную неустойчивость топографического течения, распространяющегося по склону, и генерацию мезомасштабных вихрей. На *рисунке 3а* видно, что перепад уровня моря на плато и материковом ложе превышает полтора метра. Сдвиговое течение, омывающее с юга Новозеландское плато, имеет строгую топографическую привязку к изобатам, распространяясь вдоль склона на северо-восток. Средние скорости течения (осреднение за период 1993-2022 гг.) достигают в отдельных его частях 70 см/с (*рис. 3б*).

На *рисунке 4а* показаны средние скорости течения вдоль разреза 1-100 (см. *рис. 1*). Расчеты скоростей проводились в системе координат, повернутой на  $31^\circ$  относительно

исходной системы, где ось абсцисс направлена на восток, ось ординат на север, таким образом, что в новой системе координат ось абсцисс направлена по оси разреза, а ось ординат – перпендикулярно. Рассчитывались проекции скорости на нормаль к разрезу, обозначенные на *рисунке 4а*  $U_{\text{trans+}}$ . На этом *рисунке* видно, что эти скорости достигают 45 см/с, однако такие значения наблюдаются лишь в узкой полосе между 52 и 57 пунктами, ширина которой составляет 47,6 км. Видно также, что струя интенсивна только в верхней части склона, а с глубиной скорости резко убывают, при этом на глубине 3500 м уже не превышают 10 см/с. Течения непосредственно на плато практически отсутствуют (*рис. 4а*, пункты 60-100), а вне склона на материковом ложе они невелики и составляют 10-15 см/с. На *рисунке 4б* показана доля дней, когда течение распространяется точно на северо-восток, т.е. перпендикулярно разрезу. Видно, что эта доля составляет 100% только для пунктов 47-60, а вне склона она резко уменьшается и не превышает 50%. Сказанное означает, что только на материковом склоне вектора течений имеют доминирующее направление на северо-восток весь рассматриваемый период 1993-2022 гг., в то время как вне склона такое направление векторов характерно лишь для отдельных промежутков времени.

Теперь обратимся к *рисунку 5*. На нем представлены траектории вихрей в районе исследования, где синим цветом отражены траектории циклонов, а красный цвет используется для визуализации траекторий антициклонов. Видно, что вихри разной полярности действительно распространяются по разным когерентным траекториям: антициклоны идут по изобатам непосредственно на склоне плато, по северной периферии течения, в то время как циклоны перемещаются по южной периферии – на материковом ложе. Подводя итоги анализа траекторий циклонов и антициклонов по данным МЕТА3.2, зафиксируем, что генерация антициклонов происходит преимущественно в районе склона плато – пункты 50-70 (*рис. 1*), что соответствует северной периферии струи, в то время как циклоны генерируются гораздо южнее (пункты 30-50) – на южной периферии течения. Более того, отметим, что траектории этих вихрей часто также имеют топографическую привязку: в основном вихри распространяются вдоль склона по изобатам, хотя надо отметить, что все же иногда вихри отрываются от течения, из-за чего нарушается топографическое управление их движением. Одной из причин такого нарушения может быть ветровое воздействие на поверхность океана. Другая причина – это особенности топографии: район исследования характеризуется неровностью дна и наличием множества желобов, пересекающих области генерации этих вихрей (*рис. 1*). Отрыв циклонов от доминирующего направления в большей степени характерен для циклонов, чем для антициклонов, что, возможно, связано с тем, что генерация циклонов в этом районе происходит преимущественно в области больших глубин, и их перемещение не имеет столь значительной зависимости от изменения топографии, как для антициклонов.

Обратим внимание на *рисунке 4б* на узкую область (пункты 61-63), где доля дней течений доминирующего направления близка к нулю. Очевидно, эти пункты соответствуют течениям северной периферии антициклонов, распространяющихся вдоль склона. Для циклонов аналогичной зависимости не наблюдается, возможно, потому что их траектории имеют больший разброс по сравнению с антициклонами.

Таким образом, доминирующее направление распространения мезомасштабных вихрей в районе склона Новозеландского плато совпадает с направлением течения, а траектории циклонов и антициклонов также имеют топографическую привязку к изобатам, как и само течение, при этом эти мезомасштабные вихри тесно связаны с течением: антициклоны распространяются по северной периферии течения, а циклоны – по южной. Важно отметить, что и генерация этих вихрей происходит по-разному: антициклоны генерируются преимущественно на северной периферии течения (слева), а циклоны – на южной (справа относительно направления течения). *Рисунок 6*, построенный по данным AVISO за случайные даты, подтверждает указанный факт.

Далее, анализируя траектории вихрей по отдельности, мы обнаружили множество ситуаций, когда траектории циклонов и антициклонов очень похожи по форме. Несколько таких примеров представлено на *рисунке 7*. Во всех рассмотренных случаях временной промежуток между моментами генерации пар «циклон-антициклон» не превышает нескольких недель. Данный факт, на наш взгляд, является крайне интересным и заслуживает дальнейшего изучения, так как он хорошо согласуется с теорией неустойчивости струйных течений (Poulin and Flierl, 2003), где ключевым безразмерным параметром, определяющим поведение вихрей является число Россби, а спектральные характеристики могут быть рассчитаны с помощью топографической модели Бухвальда и Адамса (Гневывшев и Белоненко, 2023; Гневывшев и др., 2023а,б; Gnevyshev et al., 2024).

Все сказанное означает, что крупномасштабная топография дна может управлять не только крупномасштабным потоком, но и регулировать его бароклинную неустойчивость, проявляющуюся в виде генерации антициклонов и циклонов на разных перифериях струи течения, а также в виде образования таких пар разнополярных вихрей (*рис. 7*).

Представленные результаты получены на основе анализа зарегистрированных в выделенных областях (см. *рис. 1*) 1401 циклонов и 1488 антициклонов с продолжительностью жизни  $> 10$  дней. На *рисунке 8* представлены гистограммы, характеризующая параметры этих вихрей. Видно, что большинство циклонов и антициклонов имеют одинаковые радиусы порядка 50 км, при этом более 40% антициклонов имеют амплитуды 3 и 4 см, являющиеся наибольшими в распределении, в то время как для циклонов это распределение более равномерно, и наибольшие амплитуды 3 и 4 см характерны менее, чем для 20% вихрей. Средние орбитальные скорости большинства циклонов и антициклонов обычно не превышают 10 см/с, а их продолжительность жизни, как правило, ограничивается 10-60 днями. Тем не менее, существуют редкие случаи, когда отдельные циклоны и антициклоны сохраняются в течение 180 суток. Однако такие долговечные явления являются исключением и встречаются крайне редко, что делает их особенно интересными для изучения.

### **Заключение и выводы**

В работе проанализированы траектории 1401 циклонов и 1488 антициклонов с продолжительностью жизни  $> 10$  дней на склоне Новозеландского плато за период 1993-2022 гг. на основе спутниковых измерений. Использовался массив абсолютной динамической топографии, а также продукт METAS.2, построенный на основе данных альтиметрии. Дополнительно использовались данные глобального океанического реанализа GLORYS12V1.

Особенностью исследуемого района является крайне крутой склон, где глубина резко увеличивается с 500 до 5000 м на расстоянии 120 км. Это приводит к формированию мощного топографического течения, направленного на северо-восток вдоль склона. Ширина струи составляет 47,6 км. Неоднородность в поле плотности, проявляющаяся на склоне Новозеландского плато, вызывает бароклинную неустойчивость течения и генерацию мезомасштабных вихрей на его периферии. На основании анализа исходной альтиметрической информации впервые установлено, что антициклоны формируются преимущественно на северной периферии струи (непосредственно на склоне), а циклоны — на южной (на материковом ложе). Топография дна влияет не только на места генерации вихрей, но и на форму их траекторий. Вихри в основном следуют вдоль изобат, при этом траектории циклонов и антициклонов пространственно разделены.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта № 116442164, и в рамках государственного задания Института океанологии РАН № FMWE-2024-0017.

### Список литературы

- 1) 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.
- 2) Гневъшев В.Г., Белоненко Т.В. Доплеровский эффект и волны Россби в океане: краткий экскурс в историю и новые подходы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16. № 3. С. 72–92. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-6.
- 3) Гневъшев В.Г., Травкин В.С., Белоненко Т.В. Топографический фактор и предельные переходы в уравнениях для субинерционных волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023а. Т. 16. № 1. С. 8–23. doi:10.48612/fpg/92rg-6t7h-m4a2.
- 4) Гневъшев В.Г., Травкин В.С., Белоненко Т.В. Групповая скорость и дисперсия шельфовых волн Бухвальда и Адамса. Новый аналитический подход // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023б. Т. 16. № 2. С. 8–20. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-1 /
- 5) Гневъшев В.Г., Фролова А.В., Колдунов А.В. и др. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 1. С. 4–14. doi: 10.7868/S2073667321010019.
- 6) Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В. и др. Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023а. Т. 508. № 2. С. 270-274. DOI: 10.31857/S2686739722602113.
- 7) Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В. и др. О вытягивании мезомасштабных вихрей в филаменты и распределении их на поверхности океана // *Известия вузов. Радиофизика*. 2023б. Том LXVI, № 2–3, С. 104-121. DOI: 10.52452/00213462\_2023\_66\_02\_104.
- 8) 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.
- 9) Жмур В.В., Травкин В.С., Белоненко Т.В. и др. О трансформации кинетической и потенциальной энергии при вытягивании мезомасштабного вихря // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 5. С. 466–480. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-466-480.
- 10) Зацепин А. Г., Елкин Д. Н. Влияние подводного хребта на перемещение антициклонических вихрей над наклонным дном под действием топографического бета-эффекта: лабораторный эксперимент // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 2. С. 298–311. EDN NETNBZ.
- 11) Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость Мирового океана. 1974. 264 с.
- 12) Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В., Колдунов А. В. Шельфовые волны в Большом Австралийском заливе по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2020, № 6, с. 73–84. DOI: 10.31857/S0205961420050085.

- 13) *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.
- 14) *Травкин В. С., Гневышев В. Г., Белоненко Т. В.* Мезомасштабные вихри на континентальном склоне Новозеландского плато по данным альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 221–233. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-221-233.
- 15) *Худякова С. П., Травкин В. С., Белоненко Т. В.* Мезомасштабные вихри Алеутского жёлоба. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 211–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-211-221.
- 16) *Arbic B. K., Scott R. B., Flierl G. R. et al.* Nonlinear Cascades of Surface Oceanic Geostrophic Kinetic Energy in the Frequency Domain // Journal of Physical Oceanography, 2012. Vol. 42. Issue 9. P. 1577–1600. doi:10.1175/jpo-d-11-0151.1.
- 17) *Belonenko T.V., Travkin V.S., Koldunov A.V. et al.* Topographic experiments over dynamical processes in the Norwegian Sea // Russ. J. Earth. Sci. 2021. V. 21. No. ES1006. doi:10.2205/2020ES000747.
- 18) *Bower A. S., Le Cann B., Rossby T. et al.* Directly measured mid-depth circulation in the northeastern North Atlantic Ocean, Nature // 2002. V. 419. No. 6907. P. 603–607. <https://doi.org/10.1038/nature01078>.
- 19) *Bower A. S., Lozier M. S., Gary S. F et al.* Interior pathways of the North Atlantic meridional overturning circulation // Nature. 2009. V. 459. No. 7244. P. 243–247. DOI: 10.1038/nature07979.
- 20) *Charney J. G.* The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current // in The Atmosphere—A Challenge, Springer. 1990. P. 223–250.
- 21) *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. V. 91. No. 2. P. 167–216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- 22) *Eady E. T.* Long waves and cyclone waves // Tellus A. 1949. V1. No. 3. P. 33–52. DOI:10.1111/J.2153-3490.1949.TB01265.X.
- 23) *Ferrari R., Wunsch C.* Ocean Circulation Kinetic Energy: Reservoirs, Sources, and Sinks // Annual Review of Fluid Mechanics. 2009. V. 41. P. 253–282. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139>.
- 24) *Gill A. E.* Atmosphere-Ocean Dynamics. 1st Edition. V. 30. 1982.
- 25) *Gill A., Green J., Simmons A.* Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies // in Deep sea research and oceanographic abstracts. Elsevier. 1974. V. 21. P. 499–528.
- 26) *Gille S. T.* Float Observations of the Southern Ocean. Part I: Estimating Mean Fields, Bottom Velocities, and Topographic Steering // Journal of Physical Oceanography. 2003. V. 33. No. 6. P. 1167–1181. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<1167:FOOTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<1167:FOOTSO>2.0.CO;2).
- 27) *Gnevyshev V. G., Travkin V. S., Belonenko T. V.* Mixed topographic-planetary waves in a stratified ocean on a background flow // Pure and Applied Geophysics. 2024. V. 181. P. 2359–2371. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03527-8>.

- 28) *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: 10.1134/S0097807822020063.
- 29) *Hogg N. G., Johns W. E.* Western boundary currents // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. Issue S2. P. 1311–1334. <https://doi.org/10.1029/95RG00491>.
- 30) *Isachsen P. E.* Baroclinic instability and eddy tracer transport across sloping bottom topography: How well does a modified Eady model do in primitive equation simulations? // *Ocean Modell.* 2011. V. 39. No.1. P. 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.09.007>.
- 31) *Isachsen P. E., LaCasce J., Mauritzen C. et al.* Wind-driven variability of the large-scale recirculating flow in the Nordic Seas and Arctic Ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. V. 33. No. 12. P. 2534–2550. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<2534:WVOTLR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2534:WVOTLR>2.0.CO;2).
- 32) *LaCasce J.H., Palóczy A., Trodahl M.* Vortices over bathymetry // *Journal of Fluid Mechanics*. 2024. V. 979. No. A32. doi:10.1017/jfm.2023.1084.
- 33) *LaCasce J.* Floats and f/h // *Journal of Marine Research*. 2000.V. 58. No. 1. P. 61–95. DOI: 10.1357/002224000321511205.
- 34) *LaCasce J. H., Escartin J., Chassignet E. P. et al.* Jet Instability over Smooth, Corrugated, and Realistic Bathymetry // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. V. 49. Issue 2. P. 585–605. doi:10.1175/jpo-d-18-0129.1.
- 35) *Lorenz E. N.* Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. 1955. V. 7. Issue 2. P. 157–167. doi:10.1111/j.2153-3490.1955.tb01148.x.
- 36) *Pedlosky J.* *Geophysical fluid dynamics*, Springer New York. 1987. 710 pp.
- 37) *Pegliasco C., Busché C., Faugère Y.* Mesoscale Eddy Trajectory Atlas META3.2 Delayed-Time all satellites: version META3.2 DT allsat. 2022. <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2022.005.210802>.
- 38) *Phillips N. A.* A simple three-dimensional model for the study of large-scale extratropical flow patterns // *J. Meteor.* 1951. V. 8. No. 6. P. 381–394. doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0381:astdmf>2.0.co.
- 39) *Poulin F. J., Flierl G. R.* The Nonlinear Evolution of Barotropically Unstable Jets // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. V. 33. No. 10. P. 2173–2192. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2173:tneobu>2.0.
- 40) *Rhines P.B.* The dynamics of unsteady currents // In: E.D. Goldberg, I.N. McCane, J.J. O'Brien and J.H. Steele (Editors). *The Sea*. V. 6. Wiley, New York. 1977. P. 189-318.
- 41) *Salmon R.* *Lectures on geophysical fluid dynamics*. Oxford University Press. 1998.
- 42) *Smith K. S.* The geography of linear baroclinic instability in earth's oceans // *Journal of Marine Research*. 2007. V. 65. No. 5. P. 655–683. DOI: 10.1357/002224007783649484.
- 43) *Stewart R. H.* *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography. Texas A & M University. 2008. 351 pp.
- 44) *Talley L. D.* *Descriptive physical oceanography: an introduction*, Academic press. 2011.

- 45) Trodahl M., Isachsen P. E.. Topographic influence on baroclinic instability and the mesoscale eddy field in the northern North Atlantic Ocean and the Nordic Seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. V. 48. No. 11. P. 2593–2607. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0220.1>.
- 46) Zhmur V.V., Belonenko T.V., Travkin V.S. et al. Changes in the Available Potential and Kinetic Energy of Mesoscale Vortices When They Are Stretched into Filaments // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. V. 11. No. 6. P. 1131. <https://doi.org/10.3390/jmse11061131>.

## The influence of topography on the movement of mesoscale eddies along the continental slope of the New Zealand Plateau

T. V. Belonenko <sup>1</sup>, V. S. Travkin <sup>1,2</sup>, V. G. Gnevyshev <sup>3</sup>, A. V. Kochnev <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

E-mail: [btvlisab@yandex.ru](mailto:btvlisab@yandex.ru)

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

<sup>3</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

<sup>4</sup> Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk 163002, Russia

### Abstract

This paper examines mesoscale eddies along the slope of the New Zealand Plateau. The study is based on altimetric measurements from 1993 to 2022: absolute dynamic topography and the META3.2 product. Additionally, data from the global oceanic reanalysis GLORYS12V1 for the same period are used. It is shown that a jet topographic current is formed on the slope of the plateau, which runs along the slope of the New Zealand plateau in a narrow strip. The velocities of this topographic flow reach 70 cm/s when averaged over 1993-2022. It has been established that the generation of mesoscale eddies mainly occurs on the periphery of the topographic flow. Anticyclones are formed on the northern (shallow) periphery of the flow, and cyclones on the southern (deep-water). The section across the slope is considered and its parts where the flow velocity components normal to the section are maximal are determined. The trajectories of 1401 cyclones and 1488 anticyclones isolated from 1993-2022 with a life expectancy exceeding 10 days are analyzed. It is shown that the trajectories of cyclones and anticyclones are controlled by topography. In most cases, the trajectories of cyclones and anticyclones have a similar shape and are spaced apart.

**Keywords:** New Zealand Plateau, seafloor topography, slope, topographic current, mesoscale eddies, altimetry

### References

- 1) 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>.

- 2) Gnevyshev V.G., Belonenko T.V., Doppler Effect and Rossby Waves in the Ocean: A Brief History and New Approaches. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, Vol. 16, No. 3, pp. 72–92, (in Russian). doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-6.
- 3) Gnevyshev V. G., Travkin V. S., Belonenko T. V., Topographic Factor and Limit Transitions in the Equations for Subinertial Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023a, Vol. 16, No. 1, pp. 8–23, (in Russian). doi:10.48612/fpg/92rg-6t7h-m4a2.
- 4) Gnevyshev V.G., Travkin V.S., Belonenko T.V., Group Velocity and Dispersion of Buchwald and Adams Shelf Waves. A New Analytical Approach. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023b, Vol. 16, No. 2, pp. 8–20, (in Russian). doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-1.
- 5) Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Koldunov A.V. et al., 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) Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V. et al., Direct and Inverse Energy Cascades in the Ocean during Vortex Elongation, *Doklady Earth Sciences*, 2023, Vol. 508, Part 2, pp. 233-236. DOI: 10.1134/S1028334X22601675.
- 7) Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V. et al., On the stretching of mesoscale vortices into filaments and their distribution over the ocean surface, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2023. Vol. 66, No. 2–3, pp. 93-108, DOI 10.1007/s11141-023-10278-4.
- 8) Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V., Potential Vorticity in the Ocean: Ertel and Rossby Approaches with Estimates for the Lofoten Vortex, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 6, pp. 632–641, DOI: 10.1134/S0001433821050157.
- 9) Zhmur V. V., Travkin V. S., Belonenko T. V. et al., Transformation of Kinetic and Potential Energy during Elongation of a Mesoscale Vortex, *Physical Oceanography*, 2022, Vol. 29, No. 5, pp. 449-462. doi:10.22449/1573-160X-2022-5-449-462.
- 10) Zatspein A.G., Elkin D.N., Underwater Ridge Impact on the Motion of Anticyclonic Eddies over a Sloping Bottom as a Result of the Topographic Beta-Effect: Laboratory Experiment, *Physical Oceanography*, 2024, Vol. 31, No. 2, pp. 271-283.
- 11) Monin A.S., Kamenkovich V.M., Kort V.G., *Variability of the World Ocean*, 1974, 264 p. (In Russian).
- 12) Sandalyuk N.V., Belonenko T.V., Koldunov A.V., Shelf Waves in the Great Australian Bight Based on Satellite Altimetry Data, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2021, Vol. 57, pp. 1117–1126, <https://doi.org/10.1134/S0001433821090619>.
- 13) Travkin V.S. Belonenko T.V., Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on Energy Analysis. *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28, No. 3, pp. 294-308, doi:10.22449/1573-160X-2021-3-294-308.
- 14) Travkin V. S., Gnevyshev V. G., Belonenko T. V., Mesoscale eddies on the continental slope of the New Zealand Plateau based on altimetry data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 221–233, (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-221-233.

- 15) Khudyakova S. P., Travkin V. S., Belonenko T. V., Mesoscale eddies of the Aleutian Trench, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 211–221. (In Russian).
- 16) Arbic B. K., Scott R. B., Flierl G. R., et al., Nonlinear Cascades of Surface Oceanic Geostrophic Kinetic Energy in the Frequency Domain, *Journal of Physical Oceanography*, 2012, Vol. 42, No. 9, pp. 1577–1600, doi:10.1175/jpo-d-11-0151.1.
- 17) Belonenko T.V., Travkin V.S., Koldunov A.V. et al., Topographic experiments over dynamical processes in the Norwegian Sea, *Russ. J. Earth. Sci.*, 2021, Vol. 21, No. ES1006, doi:10.2205/2020ES000747.
- 18) Bower A. S., Le Cann B., Rossby T. et al., Directly measured mid-depth circulation in the northeastern North Atlantic Ocean, *Nature*, 2002, Vol. 419, No. 6907, pp. 603–607, <https://doi.org/10.1038/nature01078>.
- 19) Bower A. S., Lozier M. S., Gary S. F., et al., Interior pathways of the North Atlantic meridional overturning circulation, *Nature*, 2009, Vol. 459, No. 7244, pp. 243–247, DOI: 10.1038/nature07979.
- 20) Charney J. G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, in *The Atmosphere—A Challenge*, Springer, 1990, pp. 223–250.
- 21) Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Prog. Oceanogr.*, 2011, Vol. 91, No. 2, pp. 167–216, doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- 22) Eady E. T., Long waves and cyclone waves, *Tellus A*, 1949, Vol. 1, No. 3, pp. 33–52, DOI:10.1111/J.2153-3490.1949.TB01265.X.
- 23) Ferrari R., Wunsch C., Ocean Circulation Kinetic Energy: Reservoirs, Sources, and Sinks, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, Vol. 41, pp. 253–282, <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139>.
- 24) Gill A. E., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, 1st Edition, Vol. 30, 1982.
- 25) Gill A., Green J., Simmons A., Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies, in *Deep sea research and oceanographic abstracts*, 1974, Vol. 21, pp. 499–528, Elsevier.
- 26) Gille S. T., Float Observations of the Southern Ocean. Part I: Estimating Mean Fields, Bottom Velocities, and Topographic Steering, *Journal of Physical Oceanography*, 2003, Vol. 33, No. 6, pp. 1167–1181, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<1167:FOOTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<1167:FOOTSO>2.0.CO;2).
- 27) Gnevyshev V. G., Travkin V. S., Belonenko T. V., Mixed topographic-planetary waves in a stratified ocean on a background flow, *Pure and Applied Geophysics*, 2024, Vol. 181, pp. 2359–2371, <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03527-8>.
- 28) Gnevyshev V. G., 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.
- 29) Hogg N. G., Johns W. E., Western boundary currents, *Rev. Geophys.*, 1995, Vol. 33, Issue S2, pp. 1311–1334, <https://doi.org/10.1029/95RG00491>.

- 30) Isachsen P. E., Baroclinic instability and eddy tracer transport across sloping bottom topography: How well does a modified Eady model do in primitive equation simulations? *Ocean Modell.*, 2011, Vol. 39, No. 1, pp. 183–199, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.09.007>.
- 31) Isachsen P. E., LaCasce J., Mauritzen C. et al., Wind-driven variability of the large-scale recirculating flow in the Nordic Seas and Arctic Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, 2003, Vol. 33, No. 12, pp. 2534–2550, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<2534:WVOTLR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2534:WVOTLR>2.0.CO;2).
- 32) LaCasce J. H., Palóczy A., Trodahl M., Vortices over bathymetry, *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, Vol. 979, Issue A32, doi:10.1017/jfm.2023.1084.
- 33) LaCasce J. Floats and f/h, *Journal of Marine Research*, 2000, Vol. 58, No. 1 pp., 61–95, DOI: 10.1357/002224000321511205.
- 34) LaCasce J. H., Escartin J., Chassignet E. P. et al., Jet Instability over Smooth, Corrugated, and Realistic Bathymetry, *Journal of Physical Oceanography*, 2018, Vol. 49, Issue 2. pp. 585–605, doi:10.1175/jpo-d-18-0129.1.
- 35) Lorenz E. N., Available potential energy and the maintenance of the general circulation, *Tellus*, 1955. Vol. 7, Issue 2, pp. 157–167, doi:10.1111/j.2153-3490.1955.tb01148.x.
- 36) Pedlosky J. *Geophysical fluid dynamics*, Springer New York, 1987, 710 pp.
- 37) Pegliasco C., Busché C., Faugère Y., *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas META3.2 Delayed-Time all satellites: version META3.2 DT allsat.* 2022, <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2022.005.210802>.
- 38) Phillips N. A., A simple three-dimensional model for the study of large-scale extratropical flow patterns, *J. Meteor.*, 1951, Vol. 8, No. 6, pp. 381–394, doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0381:astdmf>2.0.co.
- 39) Poulin F. J., Flierl G. R., The Nonlinear Evolution of Barotropically Unstable Jets. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, Vol. 33, No. 10, pp. 2173–2192, doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2173:tneobu>2.0.
- 40) Rhines P.B., The dynamics of unsteady currents. In: E.D. Goldberg, I.N. McCane, J.J. O'Brien and J.H. Steele (Editors), *The Sea*, Vol. 6, Wiley, New York, 1977, pp. 189-318.
- 41) Salmon R., *Lectures on geophysical fluid dynamics*, Oxford University Press, 1998.
- 42) Smith K. S., The geography of linear baroclinic instability in earth's oceans, *Journal of Marine Research*, 2007, Vol. 65, No. 5, pp. 655–683. DOI: 10.1357/002224007783649484.
- 43) Stewart R. H., *Introduction to Physical Oceanography*, Department of Oceanography. Texas A & M University, 2008, 351 pp.
- 44) Talley L. D., *Descriptive physical oceanography: an introduction*, Academic press, 2011.
- 45) Trodahl M., Isachsen P. E., Topographic influence on baroclinic instability and the mesoscale eddy field in the northern North Atlantic Ocean and the Nordic Seas, *Journal of Physical Oceanography*, 2018, Vol. 48, No. 11, pp. 2593–2607, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0220.1>.

46) Zhmur V.V., Belonenko T.V., Travkin V.S. et al., Changes in the Available Potential and Kinetic Energy of Mesoscale Vortices When They Are Stretched into Filaments, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2023, Vol. 11, No. 6, pp. 1131, <https://doi.org/10.3390/jmse11061131>.

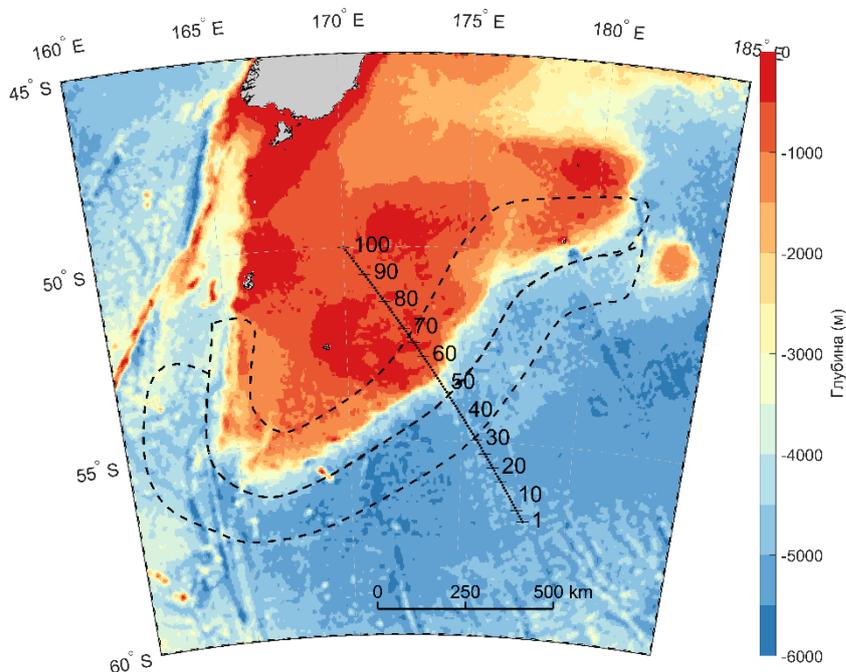


Рис. 1. Район исследования. Цветом показана донная топография. Прямой линией изображен разрез поперек склона, на который номерами нанесены пункты (от 1 до 100). Расстояние между пунктами составляет примерно 1 минуту (59-60 шагов на один градус). Угол поворота разреза относительно широты составляет  $31^\circ$ . Пунктиром нанесены две области (маски), огибающие плато, на которых анализируются траектории мезомасштабных вихрей.

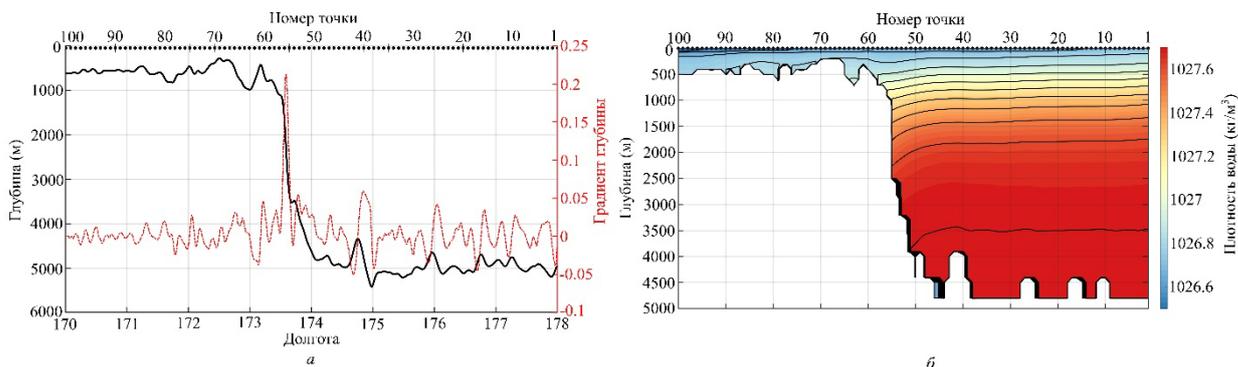


Рис. 2. Профиль глубин вдоль разреза Новозеландского плато (а); распределение плотности вдоль разреза (б).

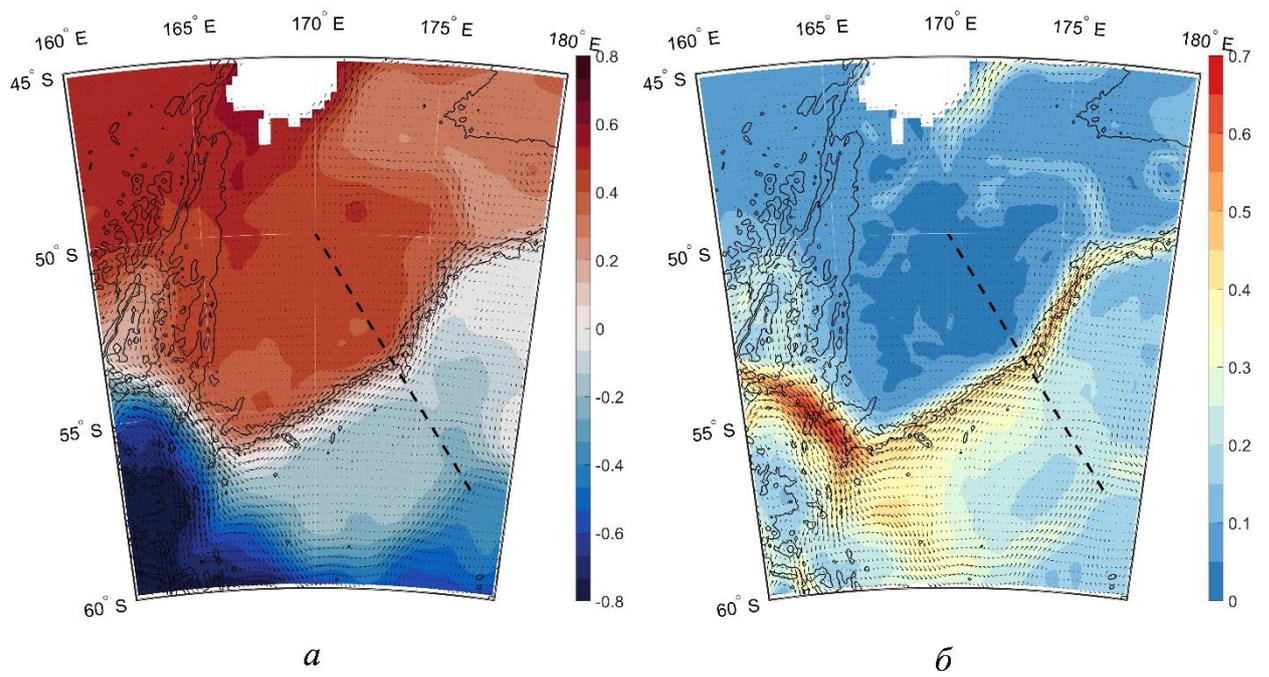


Рис. 3. Распределение значений АДТ, м (а) и средние геострофические скорости течений, м/с (б). Осреднение за 1993-2022 гг. Положительное направление – на северо-восток.

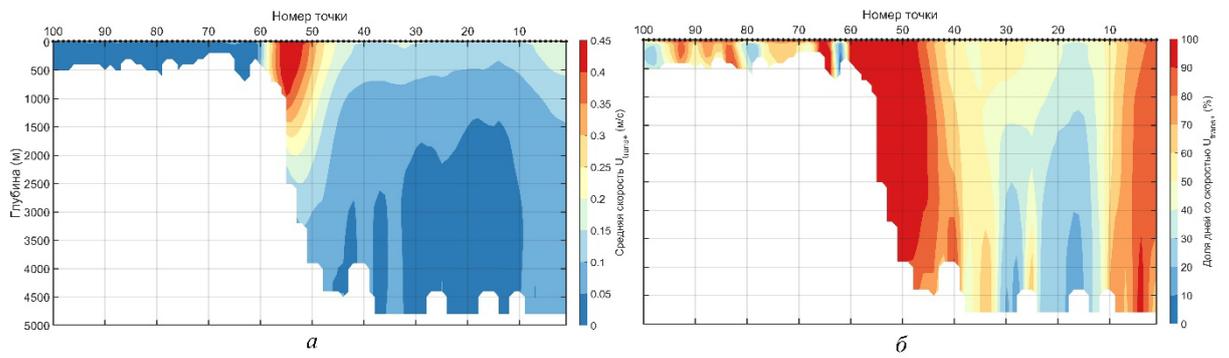


Рис. 4. Вертикальный разрез скоростей течений, м/с, направленных перпендикулярно разрезу (см. рис. 1), рассчитанные по данным GLORYS12V1 (а). Доля дней в % для скоростей данного направления (б). Осреднение за период 1993-2022 гг.

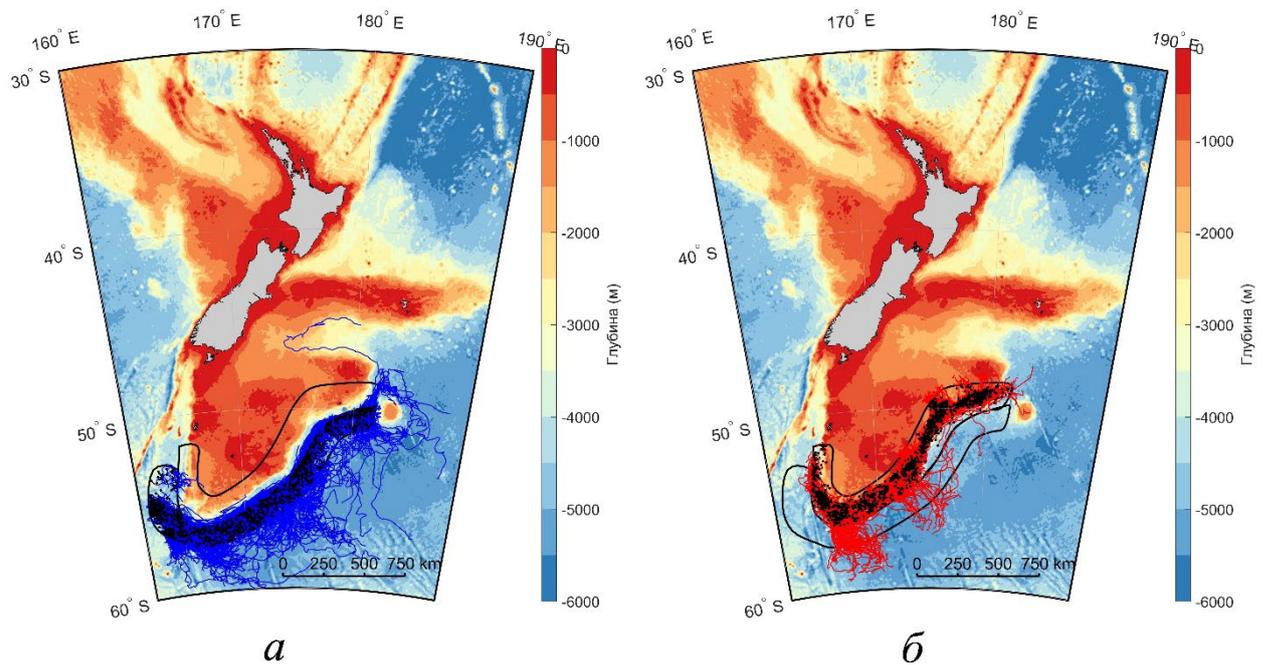


Рис. 5. Траектории циклонов (а, синий цвет) и антициклонов (б, красный цвет) по данным METAZ.2 за 1993-2022 гг. Черными точками показаны места генераций.

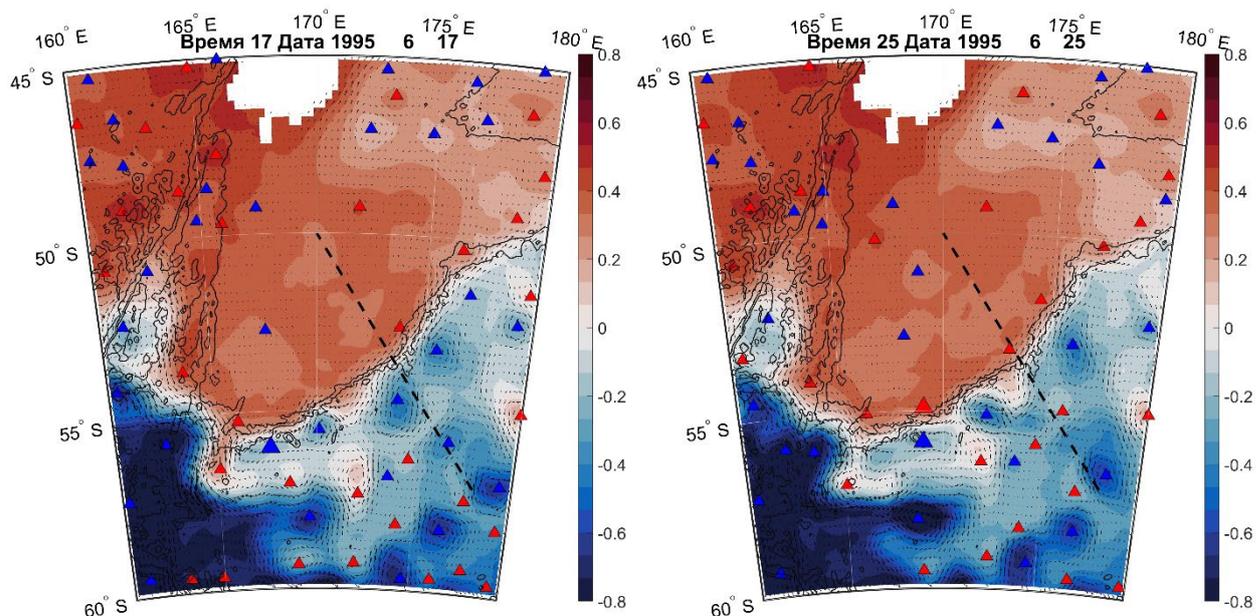


Рис. 6. Аномалии уровня моря (м) и скорости течения (стрелки) по данным AVISO за отдельные даты. Красными треугольниками показаны центры антициклонов, синими – циклонов, определенные по данным МЕТАЗ.2.

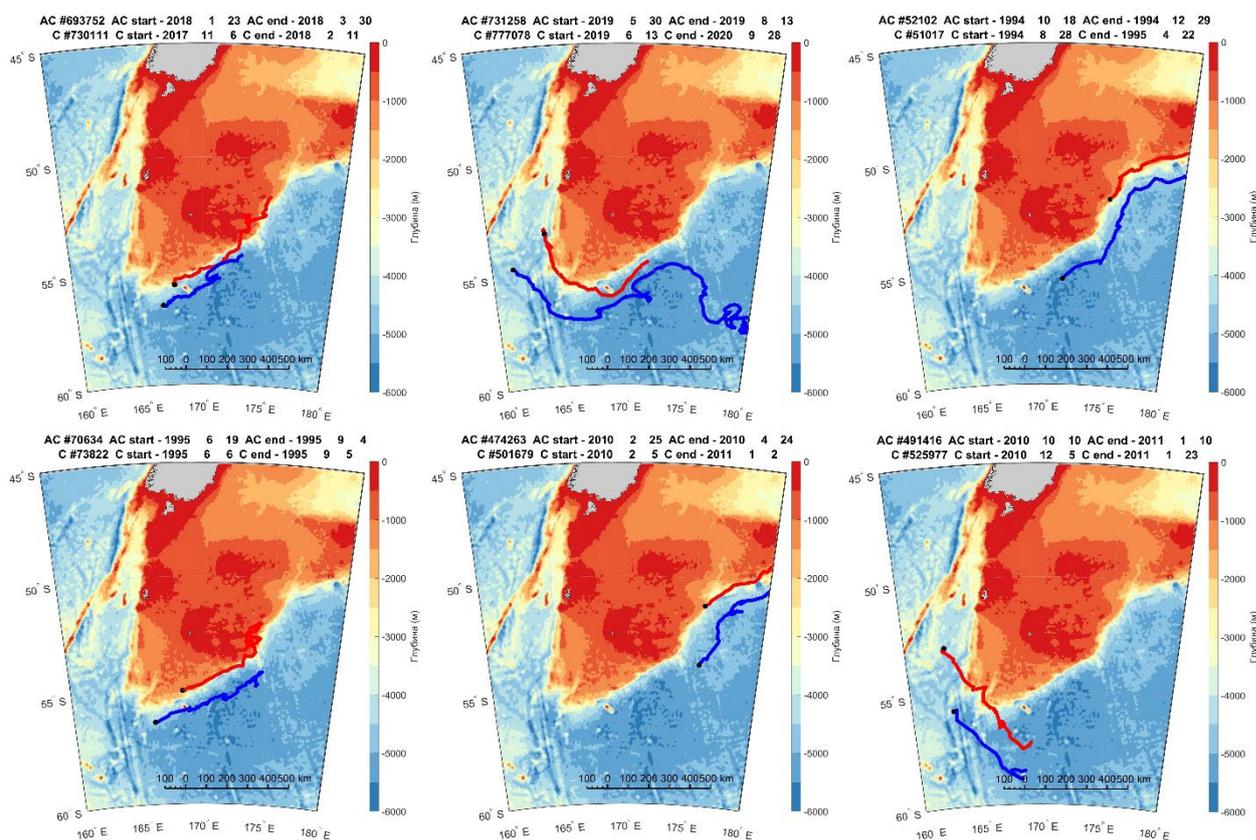
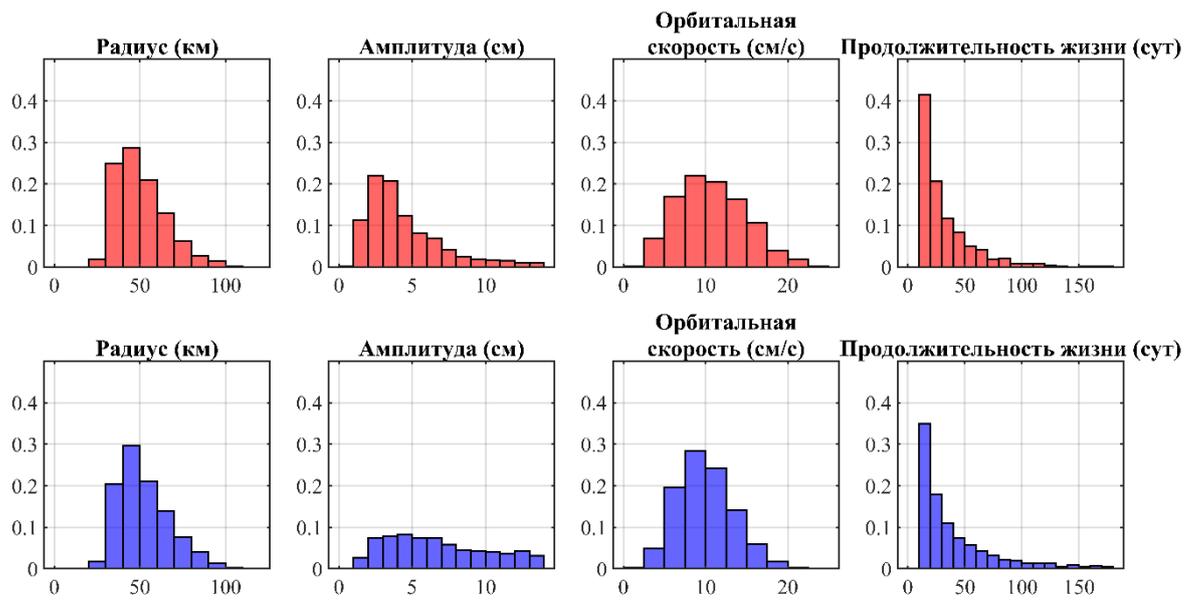


Рис. 7. Траектории распространения отдельных циклонов (синий цвет) и антициклонов (красный цвет) за отдельные даты. Черными точками показаны места генерации вихрей.



*Рис. 8.* Распределение параметров антициклонов (красный) и циклонов (синий цвет) в районе исследования. По оси абсцисс показана характеристика, по оси ординат – доля от 1.