

## Реакция океана на прохождение тихоокеанских тайфунов во внетропических широтах

А. В. Бернадо<sup>1</sup>, Т. В. Белоненко<sup>1</sup>, М. В. Будянский<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия

Рассматриваются изменения основных океанологических характеристик при прохождении супертайфуна Mindulle (№ 202116), траектория которого проходила вдоль Курило-Камчатского жёлоба. Используются данные океанологического реанализа GLORYS12V1 (англ. Global Ocean Physics Reanalysis), а также спутниковые снимки и атмосферный реанализ ERA5 (англ. ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis 5<sup>th</sup> Generation). Показано, что максимальная скорость океанических течений ( $>2$  м/с) наблюдалась на юго-восточной периферии циклонической системы и смещалась к востоку по мере движения циклона на северо-восток, что свидетельствует о его продолжительном и расширяющемся воздействии. Наиболее интенсивный апвеллинг, вызванный накачкой Экмана, наблюдался на западной периферии из-за асимметрии поля ветра, ослабевая по мере продвижения тайфуна. Температурные аномалии были преимущественно отрицательными к югу от циклонического центра, с ограниченными областями положительных аномалий на северной периферии. Аномалии солёности характеризовались более сложной структурой с чередованием зон положительных и отрицательных значений. Сравнение почасовых и среднесуточных аномалий подтвердило значительное охлаждение океана вдоль траектории тайфуна, при этом динамические изменения были более выражены, чем термохалинные. В центре циклона изменения скорости и термохалинных параметров были менее заметны по сравнению с периферией как на поверхности, так и в вертикальном разрезе. Результаты подтверждают эффективность использования данных GLORYS12V1 для исследования быстропотекающих океанических процессов, индуцированных тайфунами.

**Ключевые слова:** тайфун, изменчивость океанических полей, скорость океанических течений, температура воды, солёность, накачка Экмана, Курильские острова, спутниковые данные, GLORYS12V1, ERA5

Одобрена к печати: 30.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-254-267

### Введение

Тайфуны играют важную роль в глобальной циркуляции атмосферы и океана. Изучение их влияния на океан помогает лучше понять атмосферные процессы и спрогнозировать будущие изменения в климатических условиях. Эти мощные тропические циклоны, характеризующиеся высокой скоростью ветра и обильными осадками, представляют собой сложную систему взаимодействия атмосферы и океана. Они формируются над тёплыми водами океана, получая энергию за счёт испарения воды и конденсации водяного пара в атмосфере. Этот процесс, называемый «тепловым двигателем», приводит к образованию мощных восходящих потоков воздуха, которые, в свою очередь, формируют характерную спиральную структуру циклона (Григоркина, Фукс, 1986; Mei et al., 2015).

Взаимодействие тайфуна с океаном происходит на нескольких уровнях. Во-первых, сильный ветер вызывает перемешивание поверхностных вод, что влияет на температуру и солёность океана. Это перемешивание может как охлаждать поверхность океана, уменьшая подпитку энергии тайфуна, так и, наоборот, поднимать более тёплые воды из глубины, усиливая его интенсивность. Во-вторых, обильные осадки, выпадающие из тайфуна, увеличивают объём пресной воды в океане, изменяя его плотность и солёность, что сказывается на океа-

нических течениях и смешивании водных масс. В-третьих, волны, генерируемые тайфуном, могут достигать значительных размеров, приводя к эрозии береговой линии, повреждению морских экосистем и изменению морского дна.

Зафиксированное в последние годы увеличение частоты и интенсивности тайфунов в северо-западной части Тихого океана (Li et al., 2023) представляет собой угрозу для прибрежных регионов России, их населения и инфраструктуры. К этому усилению, вероятно, приводит ряд факторов. Повышение температуры поверхности океана, вызванное изменением климата, обеспечивает дополнительную энергию для формирования и развития тайфунов. Изменения в атмосферной циркуляции, потенциально связанные со сдвигами в глобальных климатических колебаниях, также могут влиять на траектории и интенсивность тайфунов. Кроме того, увеличение содержания водяного пара в атмосфере, прямое следствие глобального потепления, способствует образованию более сильных штормов с более высокими показателями осадков (Мамедов, Павлов, 1974; Chai et al., 2021; Heinze et al., 2024). Ожидается, что эта тенденция сохранится, что требует более глубокого понимания лежащих в основе механизмов и совершенствования методов прогнозирования. Наиболее мощные тайфуны, как правило, формируются в пик дальневосточного сезона дождей (август, сентябрь), совпадая с их перемещением в сторону Восточной Азии. Это создаёт особенно острый риск, поскольку эти сильные штормы нередко достигают берега в своей наиболее разрушительной фазе.

Актуальность данного исследования обусловлена отсутствием работ, посвящённых детальному изучению реакции океана на прохождение тайфунов в северо-западной части Тихого океана, несмотря на то что тропические циклоны в этом регионе официально отслеживаются Японским метеорологическим агентством JMA (*англ.* Japan Meteorological Agency). Проблема заключается в высокой скорости перемещения тайфунов и связанной с этим сложностью фиксации и анализа следов их воздействия на океан. Быстрое прохождение циклона затрудняет наблюдение за изменениями океанографических параметров.

Изучение воздействия тайфунов на океан существенно затруднено практически полным отсутствием регулярных и достаточно подробных данных об изменениях океанологических полей в верхних слоях океана. В отличие от данных о параметрах атмосферы (скорость ветра, атмосферное давление), которые относительно несложно получить с помощью спутниковых наблюдений и наземных метеостанций, регулярный мониторинг океанологических характеристик в верхнем квазиоднородном слое и подповерхностных слоях океана, особенно в районах прохождения тайфунов, представляется сложной задачей. Существующие данные зачастую фрагментарны, получены в рамках отдельных экспедиций или с помощью редких замеров, что не позволяет получить полную и объективную картину реакции океана на прохождение тайфунов. Это ограничение значительно снижает точность существующих моделей, затрудняя прогнозирование последствий тайфунов и оценку их долговременного влияния на морскую среду.

Цель настоящей работы заключается в исследовании воздействия тайфуна Mindulle (2021) на океанографические характеристики северо-западной части Тихого океана в районе Курильских островов. Ввиду ограниченности данных о реакции океана на прохождение тайфунов и отсутствия регулярных наблюдений за изменениями океанологических полей в верхних слоях, исследование сфокусируется на реконструкции изменений океанографических параметров (температуры, солёности, поверхностных течений) в зоне прохождения тайфуна Mindulle. Для достижения этой цели будут использованы данные глобального вихре-разрешающего океанического реанализа GLORYS12V1 (*англ.* Global Ocean Physics Reanalysis) (Lellouche et al., 2021).

Ключевой вопрос настоящего исследования — возможность использования данных выбранного реанализа для изучения воздействия тайфуна Mindulle на океан. Заинтересованность в применении данных реанализа обусловлена их потенциальной способностью восполнить недостаток прямых океанографических измерений, особенно в отношении высокочастотных изменений океанологических параметров, вызванных прохождением тайфуна. Однако необходимо критически оценить пригодность данных реанализа GLORYS12V1 для

решения поставленной задачи. Важно определить, позволяет ли данное пространственное и временное разрешение надёжно зафиксировать и проанализировать краткосрочные изменения океанографических полей.

Особенностью тайфуна Mindulle является его прохождение вдоль Курильской гряды, что делает изучение его воздействия на океанографические условия в этом районе особенно важным для решения промысловых задач. Курильские острова расположены в зоне, подверженной активной циклонической деятельности, и понимание их влияния на близлежащую акваторию критично для разработки эффективных стратегий в сферах морской безопасности, рыболовства и морского транспорта. Полученные данные включают нужную информацию для понимания глобальных процессов взаимодействия океана и атмосферы и могут способствовать улучшению климатических моделей для более точного прогнозирования будущих изменений.

Mindulle впервые был зафиксирован 21 сентября 2021 г. как зона конвекции, образовавшаяся в 1300 км от острова Гуам ( $13^{\circ}28'$  с. ш.,  $144^{\circ}45'$  в. д.), архипелаг Марианских островов, который находится в западной части Тихого океана. При анализе спутниковых снимков заметно формирование явно выраженного глаза бури диаметром 28 км и углубление центрального ядра 26 сентября, на этапе максимального развития Mindulle классифицировался как тайфун, эквивалентный 5-й категории по шкале Саффира – Симпсона, наименьшее давление в центре — 920 гПа, наибольшая устойчивая скорость ветра — 259 км/ч. Дальнейший анализ спутниковых изображений (*рис. 1*) в сочетании с моделями атмосферной циркуляции позволил получить более полное представление о динамике и энергетическом балансе тайфуна Mindulle на стадии максимальной интенсивности. В 00:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) 2 октября JMA выпустило последнее предупреждение о супертайфуне, тогда у побережья острова Хоккайдо, Япония, он перешёл в категорию внетропического циклона. Движение продолжилось на северо-восток до момента полной диссипации к 5 октября 2021 г. Анализ траектории перемещения позволяет оценить взаимодействие с атмосферными фронтами на различных этапах существования циклона.

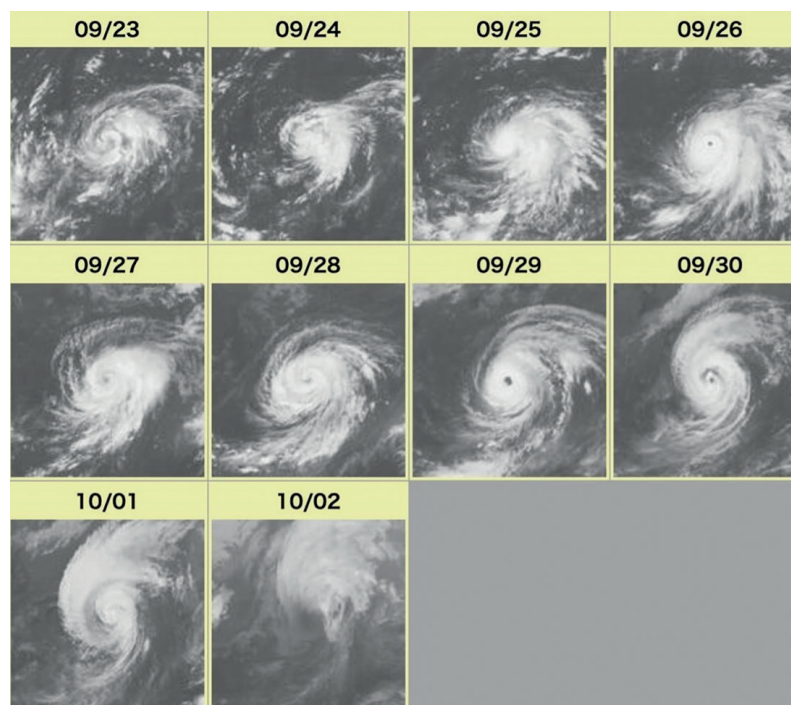


Рис. 1. Снимки тайфуна Mindulle со спутника Himawari-8

В настоящей работе рассматривается акватория, ограниченная  $40\text{--}50^{\circ}$  с. ш.,  $140\text{--}160^{\circ}$  в. д. Тайфун Mindulle прошёл через район исследования 2 октября 2021 г.

## Описание данных

В работе используется массив данных GLORYS12V1, представляющий собой глобальный вихреразрешающий океанический реанализ с пространственной дискретностью  $1/12^\circ$  по широте и долготе. Основой реанализа является гидродинамическая модель NEMO (*англ.* Nucleus for European Modelling of the Ocean). Данные реанализа охватывают период с 1993 г. по настоящее время. Особенность реанализа состоит в том, что в нём ассимилированы с использованием фильтра Калмана пониженного порядка данные спутниковой альтиметрии, спутниковые наблюдения за температурой поверхности моря, данные дрейфующих буёв, *in situ* измерения (вертикальные профили температуры и солёности), а также вертикальные профили температуры и солёности *in situ* из базы данных CORA (*англ.* Coriolis Ocean Dataset for Reanalysis). Атмосферный форсинг модели задаётся реанализом Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 (*англ.* ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> Generation). Физические характеристики реанализа GLORYS12V1 по вертикали имеют 50 горизонтов (от 0 до 5500 м) с шагом от 1 м вблизи поверхности до 453 м на нижних горизонтах.

В нашем исследовании данные реанализа GLORYS12V1 используются в двух версиях за общий промежуток 2021 г.:

- 1) Global Ocean Physics Reanalysis (Delayed-Time, далее DT);
- 2) Global Ocean Physics Analysis and Forecast (Near Real-Time, далее NRT).

Массив данных DT содержит среднесуточные и среднемесячные значения температуры, солёности, компонент скорости течения (зональной  $u$  и меридиональной  $v$ ), уровня моря, а также глубины смешанного слоя. В отличие от DT, массив NRT характеризуется более высоким временным разрешением, включая данные с часовой, шестичасовой, среднесуточной дискретизацией для температуры, солёности и скорости течения. Объединение данных DT и NRT обеспечивает комплексный набор океанографических параметров с различным временным разрешением, необходимый для анализа широкого спектра океанических процессов. Данные доступны на портале Европейского центра морских прогнозов CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service) ([data.marine.copernicus.eu](http://data.marine.copernicus.eu)).

Использовались данные ERA5. ERA5 — это глобальный набор данных атмосферного реанализа, разработанный ECMWF. Он предоставляет детальную информацию о состоянии атмосферы, суши и океана начиная с 1950 г. и до настоящего времени. Данные ERA5 охватывают широкий спектр метеорологических переменных, таких как температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, осадки и др. Набор данных доступен через платформу CDS (*англ.* Copernicus Climate Data Store) ([cds.climate.copernicus.eu](http://cds.climate.copernicus.eu)).

## Результаты

### Отображение тайфуна Mindulle (2021) в поле ветра

Циклоническая система в момент прохождения вдоль Курильских островов характеризовалась низким атмосферным давлением, мощными ветрами и интенсивными осадками. По мере перемещения тайфуна на север происходило окклюдирование, что способствовало уменьшению скорости ветра непосредственно вокруг циклонического центра («глаза бури») одновременно с увеличением скорости перемещения. Скорость перемещения составляла 46 км/ч в северо-восточном направлении, тогда Mindulle двигался быстрее по сравнению с другими периодами своего существования (средняя скорость перемещения за весь период — 18 км/ч), давление в центре — 976 гПа, максимальная устойчивая скорость ветра уменьшалась с 30 до 25 м/с.

Скорость выпадения жидких осадков (в мм/ч) определяется по данным дистанционного зондирования NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) IMERG (*англ.*

Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM). Представлены карты осадков за 2–3 октября 2021 г., совмещённые со спутниковыми снимками Aqua/MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (рис. 2).

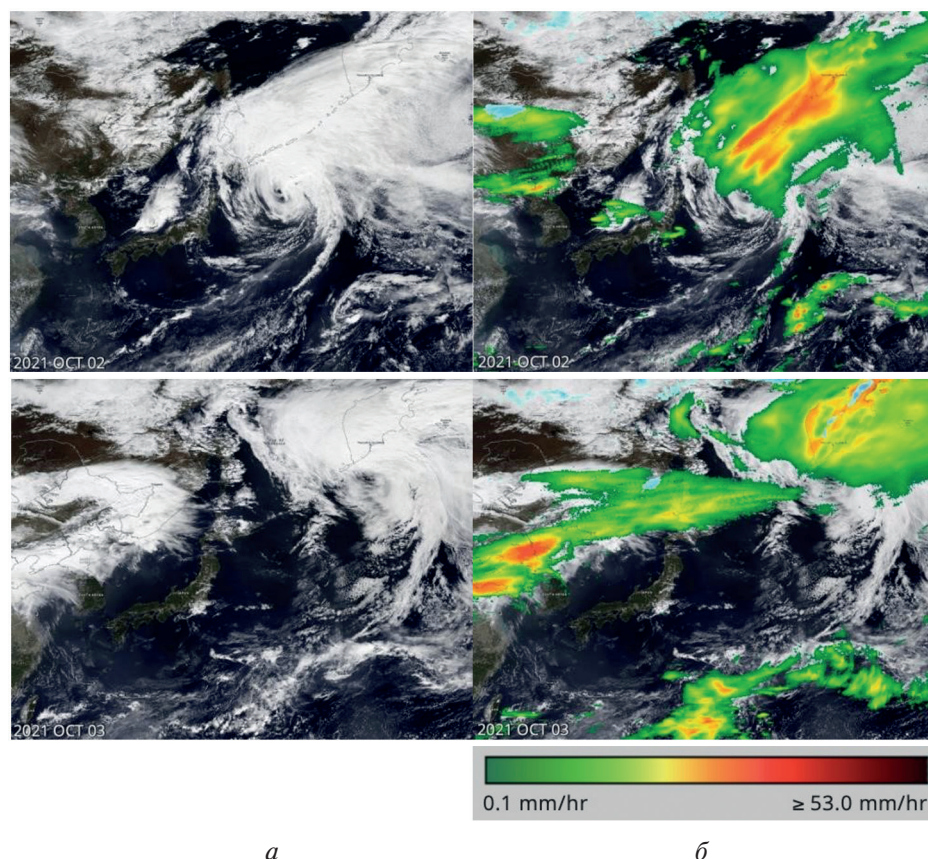


Рис. 2. Спутниковые снимки Aqua/MODIS (а) и скорость выпадения осадков по IMERG (в мм/ч) (б) в период с 2 (вверху) до 3 (внизу) октября 2021 г.

### **Динамические изменения океанических полей при прохождении тайфуна Mindulle (2021)**

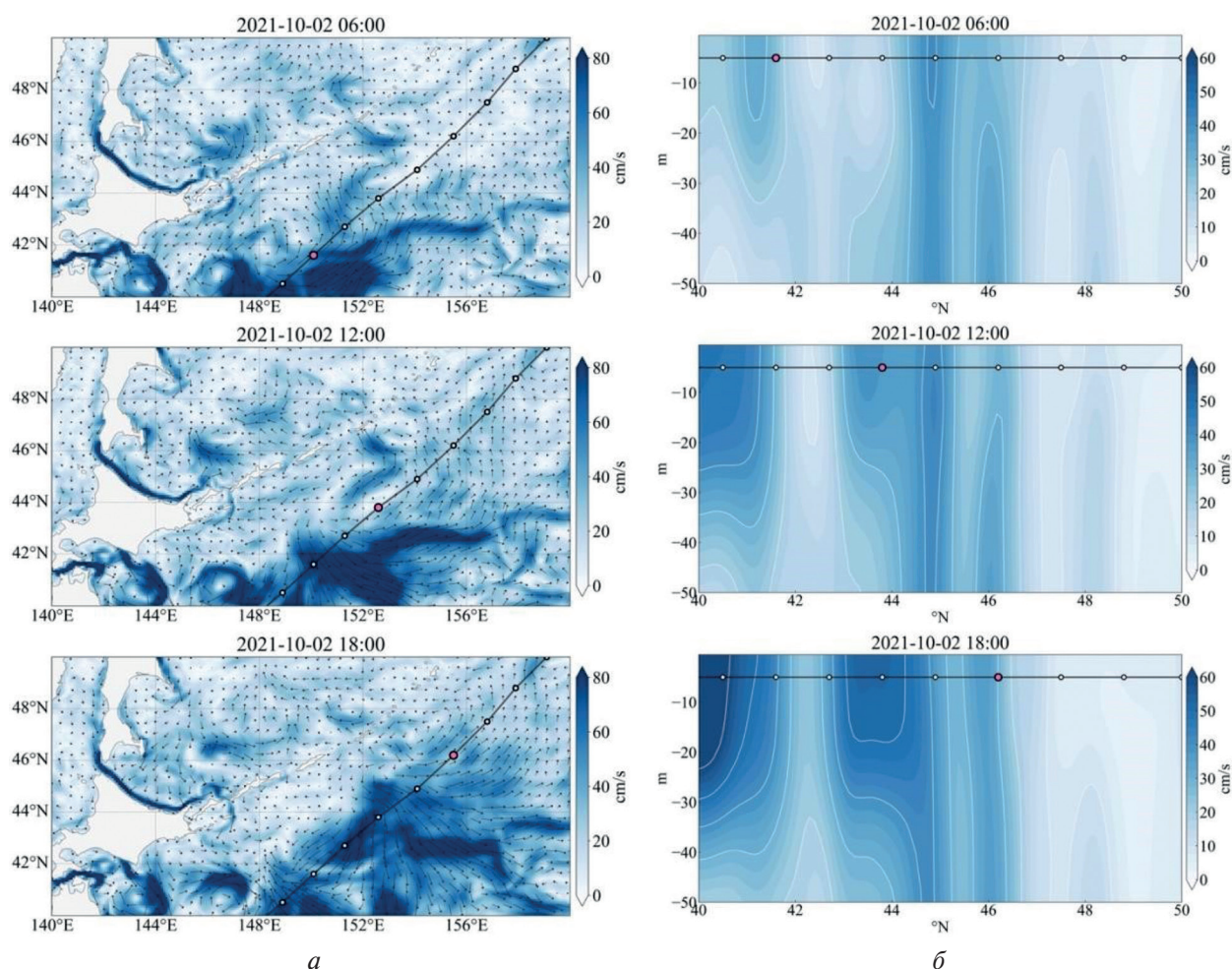
Проанализируем пространственное распределение океанологических полей у поверхности в период прохождения тайфуна Mindulle по данным GLORYS12V1. На первом этапе проводилось сравнение данных DT и NRT с суточной дискретностью за конкретные даты. Оказалось, что разница между соответствующими значениями указанных массивов в скорости течений в среднем составляет 9–11 см/с и характерна для северо-восточной части рассматриваемой акватории. Максимальная разница превышает 2 м/с (202–220 см/с) и наблюдается на юго-западе района исследования, где по данным NRT расположен вихрь у берегов Японии, который по данным DT также фиксируется, но с гораздо меньшей детализацией. Вблизи траектории перемещения центра Mindulle вдоль Курильской гряды разница значений NRT и DT составляет в среднем 24–25 см/с, а максимум — 60–62 см/с. В целом максимальная по модулю разница между значениями массивов находится в пределах 40–60 см/с.

Различие между массивами данных NRT и DT предположительно обусловлено не погрешностью данных, а различием в точности представления крупномасштабных структурных элементов океанических полей. Согласно описанию, массив DT демонстрирует более высокую степень точности, что, вероятно, связано с дополнительной обработкой и калибровкой данных, позволяющими более точно воспроизводить крупномасштабные особенности и динамику океанических процессов.

Однако для анализа быстрого и кратковременного воздействия Mindulle, характеризующегося прохождением через рассматриваемый район в течение одного дня с высокой скоростью, применение данных NRT с более частой дискретизацией предпочтительнее. Высокое временное разрешение NRT позволяет более адекватно зафиксировать быстрые изменения океанических параметров, вызванные прохождением тайфуна.

Отмечается завышение значений глубины квазиоднородного слоя для выбранной акватории, рассчитанных по данным DT относительно аналогичных значений, вычисленных по NRT.

На *рис. 3* представлено изменение скорости течений на горизонте 0,5 м по данным NRT с временной дискретностью 1 ч. Отметим, что данные NRT позволяют проанализировать скорости не только образованные квазигеострофической, ветровой, приливной составляющими по отдельности, но и все три составляющие вместе. На *рис. 3* положение тайфуна Mindulle показано красной точкой и фиксировалось каждые три часа, траектория перемещения построена по данным синоптического мониторинга JMA.



*Рис. 3.* Композитные скорости поверхностных океанических течений по данным NRT (в см/с) (*а*) и вертикальный профиль скорости (в см/с) (*б*). Над каждой иллюстрацией указаны соответствующие дата и время. Соединёнными точками показана траектория тайфуна Mindulle; красной точкой отмечено положение центра циклона

На *рис. 3а* видно, что максимальная скорость геострофических течений на поверхности наблюдается преимущественно на юго-восточной периферии циклона. К 06:00 UTC 2 октября 2021 г. зона максимальных скоростей течения была сосредоточена на юго-восточной периферии Mindulle, в непосредственной близости от его центра (42° с. ш., 149° в. д.).

С последующим перемещением циклона в северо-восточном направлении (к 12:00 UTC, 44° с.ш., 151° в.д.) зона максимальных скоростей сохранила положение относительно траектории циклона, распространяясь восточнее в виде протяжённых струй. К 18:00 UTC зона максимальных скоростей течения продолжала дальнейшее смещение к востоку, увеличивая пространственный масштаб и охватывая значительно большую акваторию. Это свидетельствует о том, что влияние Mindulle на океанические течения сохранялось, а зона экстремальных скоростей расширялась. Эти распределения скорости течения указывают на сложную динамику взаимодействия между тайфуном и океаническими течениями, требующую дальнейшего исследования.

Примечательно, что, несмотря на повышенную скорость течения в непосредственной близости от центра циклона, максимальная скорость наблюдается на периферии. Вертикальный разрез, построенный вдоль траектории движения тайфуна (см. *рис. 3б*), выявляет повышенные скорости течения (до 40–50 см/с) в верхнем квазиоднородном слое океана, простирающемся до глубины порядка 50 м. Это указывает на сосредоточение энергии ветрового воздействия в верхнем слое океана и формирование интенсивных поверхностных течений в ответ на прохождение циклонической системы. Дальнейший анализ вертикальной структуры поля скоростей необходим для оценки глубины проникновения ветрового воздействия и определения вклада различных физических механизмов в формирование наблюдаемой динамики.

### **Влияние прохождения тайфуна Mindulle (2021) на процесс экмановской накачки**

Накачка Экмана представляет собой механизм переноса импульса и энергии из атмосферы в океан. Ветровое воздействие на поверхность океана индуцирует вызванное эффектом Кориолиса вращательное движение водных масс — экмановский спиральный поток. Этот процесс приводит к горизонтальному переносу воды, формируя экмановское течение, перпендикулярное направлению ветра. Накопление воды в определённых областях, обусловленное конвергенцией экмановского течения, может приводить к изменениям уровня моря и способствовать явлению апвеллинга — подъёму глубинных водных масс. Апвеллинг играет существенную роль в биогеохимических циклах океана, поскольку поднимающиеся воды часто обогащены питательными веществами, стимулирующими продуктивность фитопланктона и влияющими на распределение биологической массы. Интенсивность накачки Экмана зависит от скорости и направления ветра, широты и стратификации водной толщи. В условиях прохождения тропических циклонов экстремально сильный ветер способен существенно модифицировать экмановскую накачку, вызывая значительные изменения в поверхностных течениях и вертикальной циркуляции воды.

В данном разделе представлены результаты расчёта накачки Экмана, основанные на данных атмосферного реанализа ERA5. Ветровое напряжение определялось как произведение плотности воздуха ( $1,29 \text{ кг/м}^3$ ) и скорости ветра, умноженное на коэффициент трения, зависящий от скорости ветра у поверхности. Завихренность ветрового напряжения вычислялась как вертикальная составляющая ротора вектора ветрового напряжения, представляющий собой разность частных производных меридиональной и зональной компоненты ветрового напряжения по пространственным координатам. Полученное значение завихренности, характеризующее вращение вертикального столба воздуха, было использовано для расчёта экмановской накачки с учётом плотности морской воды ( $1025 \text{ кг/м}^3$ ) и параметра Кориолиса, варьирующегося в зависимости от широты. Экмановская накачка рассчитывалась как отношение завихренности ветрового напряжения к произведению плотности морской воды и параметра Кориолиса. Положительные значения экмановской накачки указывают на апвеллинг, отрицательные — на даунвеллинг. Результаты расчётов представлены на *рис. 4* (см. с. 261).

На *рис. 4* видно закономерное ослабление экмановской накачки по мере продвижения тайфуна Mindulle на северо-восток. Более выраженная экмановская накачка наблюдается на западной периферии Mindulle, что обусловлено асимметрией ветрового поля в цикло-

нической системе. Эта асимметрия, в свою очередь, может быть связана с взаимодействием с фоновыми океаническими течениями и другими атмосферными факторами. Уменьшение интенсивности циклона, сопровождающееся снижением скорости ветра и количества осадков, может лишь косвенно замедлять накачку Экмана, поскольку для поддержания интенсивного экмановского транспорта необходима значительная энергия ветрового воздействия.

Отметим, что ослабление тропического циклона не всегда коррелирует с уменьшением интенсивности экмановской накачки. На интенсивность, помимо скорости ветра, влияют такие факторы, как температура поверхности моря и атмосферное давление. Взаимодействие этих параметров задаёт градиенты давления и ветровое напряжение, определяющие интенсивность экмановского транспорта.

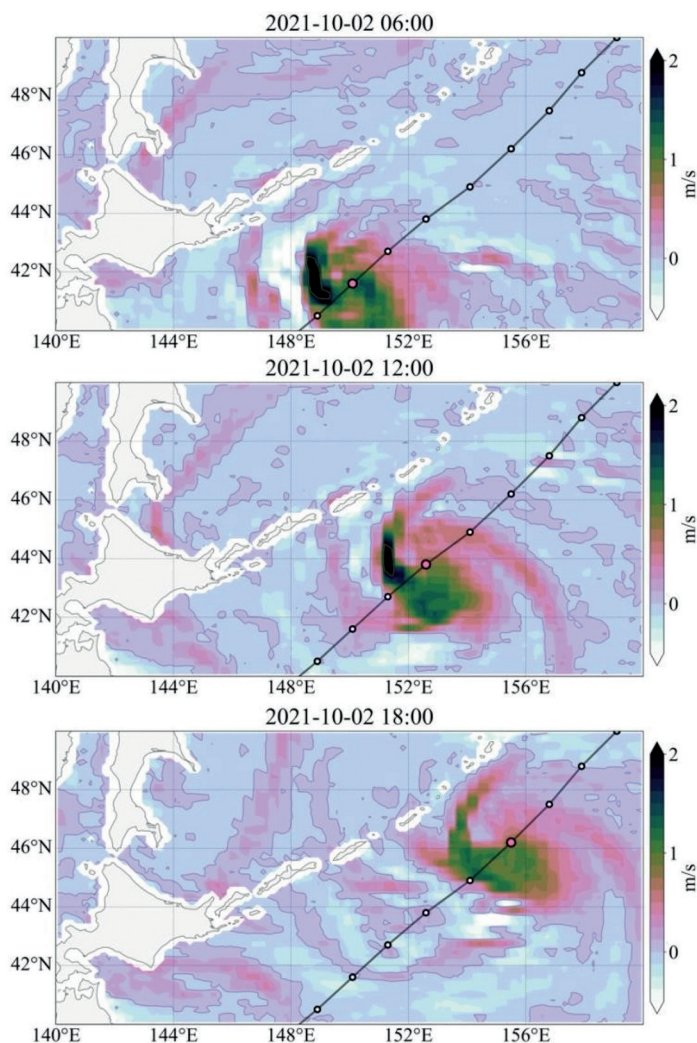


Рис. 4. Интенсивность процесса накачки Экмана (в м/с). Над каждой иллюстрацией указаны соответствующие дата и время. Соединёнными точками показана траектория центра Mindulle; красной точкой отмечено текущее положение центра циклона

### **Термохалинные изменения океанических полей при прохождении тайфуна Mindulle (2021)**

Локальная термодинамическая реакция океана на прохождение тайфуна Mindulle характеризуется формированием циклонического вихря в верхнем квазиоднородном слое. Эффект Кориолиса индуцирует экмановский отток воды от центра циклона, компенсируемый апвеллингом. Накопление воды на периферии апвеллинговой зоны и сопутствующее опускание

воды на нижележащие горизонты обусловлены интенсивным импульсом в центральной части вихря. К адвективному переносу тепла прибавляются эффекты ветрового и конвективного перемешивания. Анализ пост-тайфунных температурных полей выявляет горизонтальный перенос поверхностных вод, сопровождающийся охлаждением за пределами центральной зоны вихря. Циклоническая циркуляция наблюдалась вокруг области максимальной интенсивности тайфуна. Асимметрия ветрового поля, приводящая к увеличению скорости перемещения, способствует усилению правосторонней асимметрии температурного следа, повышает теплообмен с атмосферой и интенсифицирует апвеллинг, одновременно сокращая пространственные масштабы температурного следа и зоны апвеллинга.

Рисунок 5 иллюстрирует поля часовых приращений температуры и солёности, рассчитанных как разность между значениями параметров в каждой пространственной точке в текущий и предшествующий час. Данный подход позволяет визуализировать временную изменчивость термохалинных характеристик с высоким временным разрешением.

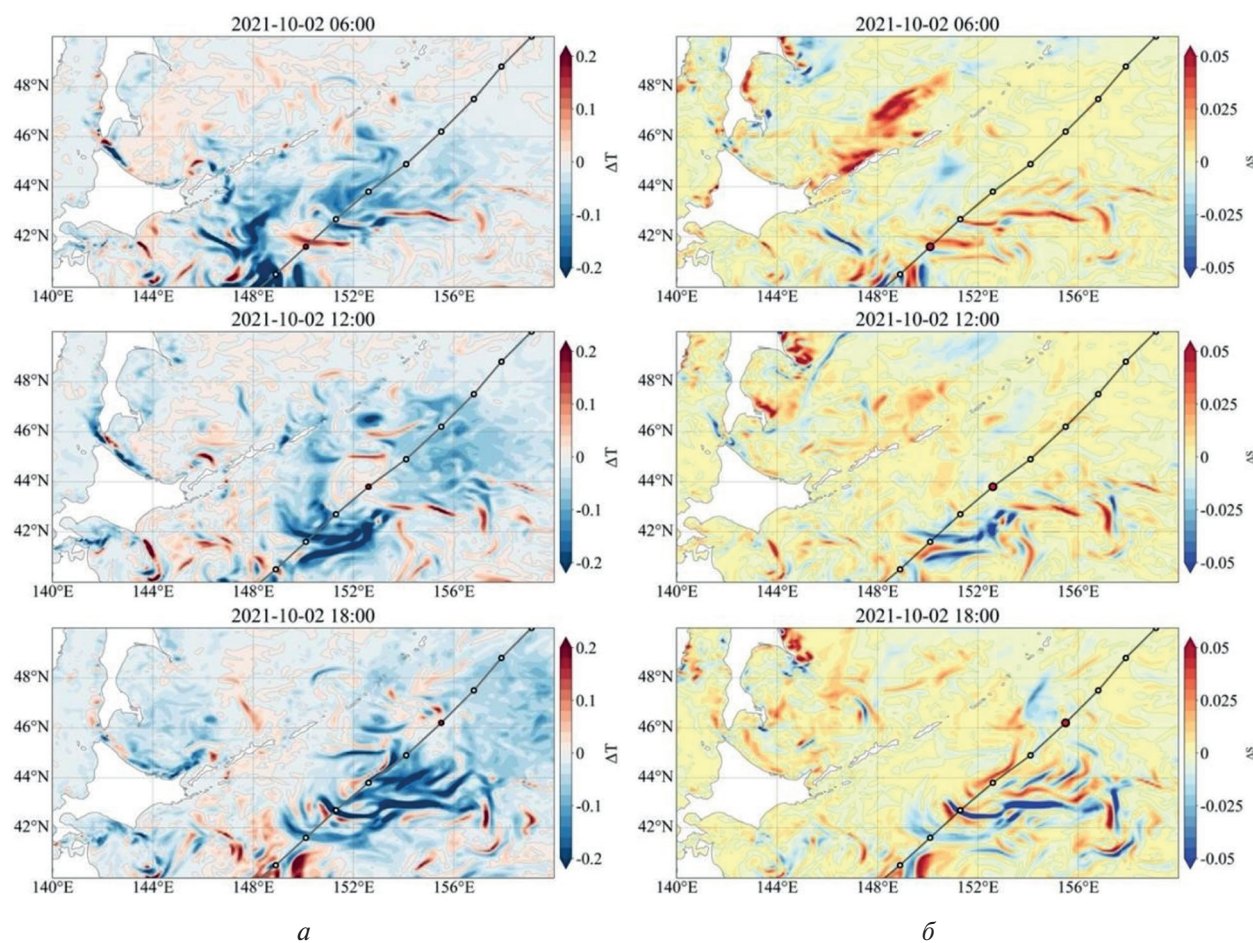


Рис. 5. Почасовые изменения температуры (в °C) (а) и солёности (в psu) (б). Над каждой иллюстрацией указаны соответствующие дата и время. Соединёнными точками показана траектория центра Mindulle; красной точкой отмечено текущее положение центра циклона

Анализ часовых приращений температуры и солёности (см. рис. 5) показывает преобладание отрицательных аномалий к югу от центра циклона, формирующих протяжённые зоны отрицательных приращений, ориентированные в зональном направлении. На северной периферии циклона наблюдаются ограниченные по пространственному масштабу области с положительными приращениями. В отличие от температурных аномалий, поля часовых приращений солёности демонстрируют более сложную пространственную структуру и меньшую амплитуду аномалий. Тем не менее преобладание отрицательных аномалий также наблюда-

ется к югу от центра циклона, что указывает на существенное влияние динамических процессов, индуцированных тайфуном, на распределение солёности в поверхностном слое океана. Всё это свидетельствует об асимметричном распределении термохалинных аномалий вокруг центра циклона, вероятно, обусловленном взаимодействием между ветровым полем и фоновыми океаническими течениями.

Рисунок 6 демонстрирует поля аномалий температуры и солёности относительно средних значений, рассчитанных за период 1–4 октября 2021 г., включающий время прохождения тайфуна Mindulle через рассматриваемый регион. Общая пространственная структура аномалий схожа со структурой часовых приращений, представленных на рис. 5, однако амплитуда аномалий значительно больше. В отличие от рис. 5, где максимальные значения часовых приращений температуры и солёности составляли  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0,05\text{ psu}$  соответственно, аномалии относительно среднего в пять раз больше и достигают  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0,2\text{ psu}$ . Наблюдается преобладание отрицательных температурных аномалий за тайфуном, движущимся в северо-восточном направлении. Распределение аномалий солёности представляет собой как отрицательные, так и протяжённые зоны положительных аномалий, ориентированных в зональном направлении (см. рис. 6). Таким образом, анализ полей аномалий температуры и солёности, рассчитанных относительно средних значений за период прохождения тайфуна Mindulle, показывает значительное охлаждение поверхностного слоя океана за траекторией движения. В то же время изменения солёности менее очевидны и характеризуются как понижением, так и повышением солёности в зависимости от пространственного расположения, что указывает на комплексное влияние динамических процессов, индуцированных тайфуном, на термохалинную структуру верхнего слоя океана.

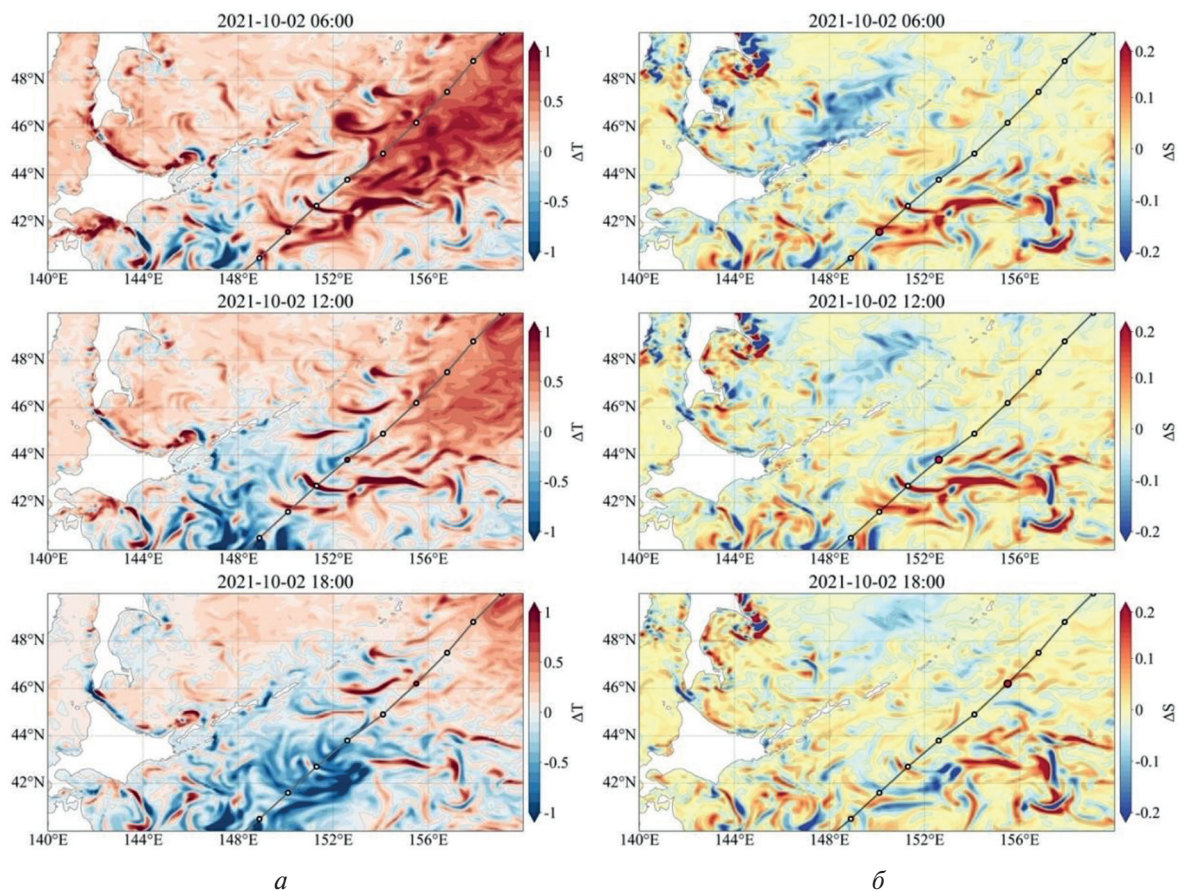
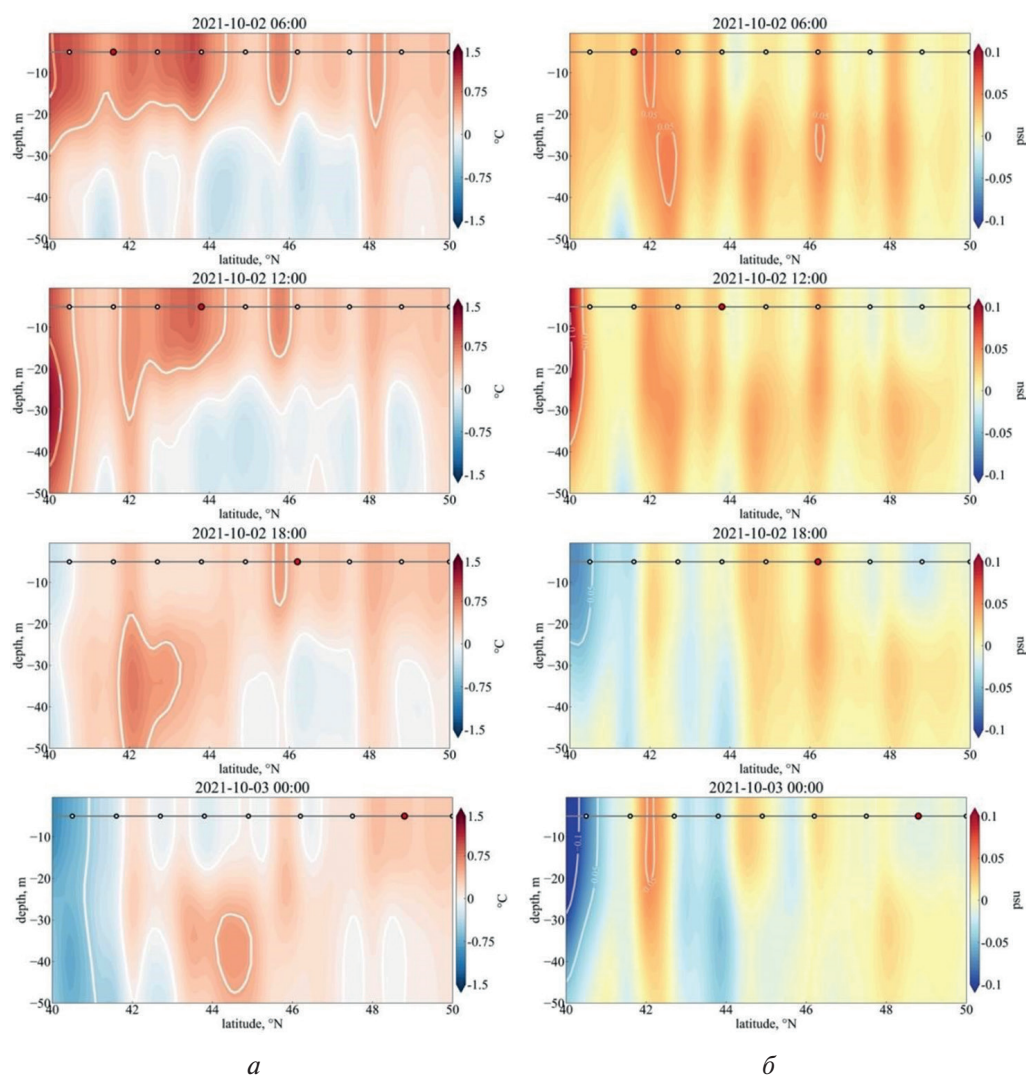


Рис. 6. Изменение температуры (в  $^{\circ}\text{C}$ ) (а) и солёности (в psu) (б) относительно среднего значения за период 1–4 октября 2021 г. Над каждой иллюстрацией указаны соответствующие дата и время. Соединёнными точками показана траектория центра Mindulle; красной точкой отмечено текущее положение центра циклона

На *рис. 7* представлены вертикальные разрезы аномалий температуры и солёности, построенные вдоль траектории тайфуна и рассчитанные относительно средних значений за период 1–4 октября 2021 г. Отметим, что в центре циклона изменения температуры и солёности невелики (см. *рис. 3*). Аномалии температуры не превышают 1–2 °C, а солёности — 0,1 psu, причём такие значения ограничены глубиной 50 м. Более того, в центре циклона не отмечаются отрицательные значения температуры, как это наблюдается для периферии циклона. Это подтверждает более слабое влияние ветрового воздействия и смешения вод в центре тайфуна по сравнению с его периферией, где обнаруживается более интенсивный апвеллинг и горизонтальный перенос водных масс. Более слабое влияние ветрового воздействия и смешения вод в центральной области тайфуна, в сравнении с периферией, объясняется структурой ветрового поля циклона. Максимальная скорость ветра сосредоточена на периферии, где и наблюдаются наиболее интенсивный экмановский транспорт и апвеллинг. В центре же скорость ветра значительно ниже, что приводит к ослаблению ветрового воздействия на верхний слой океана и, следовательно, к менее выраженным термохалинным аномалиям. Таким образом, пространственное распределение термохалинных аномалий отражает нелинейную зависимость интенсивности океанического ответа от интенсивности ветрового воздействия тайфуна.



*Рис. 7.* Вертикальный профиль изменения температуры (в °C) (а) и солёности (в psu) (б) относительно среднего значения за период 1–4 октября 2021 г., построенный вдоль траектории движения. Над каждой иллюстрацией указаны соответствующие дата и время. Соединёнными точками показана траектория центра Mindulle; красной точкой отмечено текущее положение центра циклона

## Обсуждение и выводы

Важнейшим результатом данной работы стала возможность изучения реакции океана на прохождение тайфуна по данным реанализа. За рассматриваемый промежуток времени (октябрь 2021 г.) эти данные имеются в двух версиях: DT и NRT. Так как скорость прохождения тайфунов в регионе достаточно велика, основное исследование проводилось по данным NRT, которые имеют не только суточную, но также часовую и шестичасовую временную дискретность, что позволило получить детальную картину океанического ответа на прохождение тайфуна Mindulle. Результаты подтверждают эффективность использования выбранных данных для исследования краткосрочных океанических процессов, индуцированных тайфунами.

В результате проведённой работы получены следующие выводы.

При прохождении тайфуна воздействию подвергается верхний квазиоднородный слой, глубина которого в исследуемом районе составляет до 50 м.

В период прохождения тайфуна Mindulle вдоль Курильских островов максимальная скорость течения, превышающая 2 м/с, характерна преимущественно для юго-восточной периферии тайфуна Mindulle. В дальнейшем по мере перемещения тайфуна на северо-восток зона максимальных скоростей смещалась к востоку относительно траектории движения и охватывала значительно большую область. Это указывает на продолжающееся влияние тайфуна Mindulle на океанические течения и расширение зоны воздействия экстремальных скоростей.

Наиболее интенсивно процесс экмановской накачки, вызывающий апвеллинг, происходит на западной периферии тайфуна Mindulle, что связано с асимметричностью напряжения поля ветра. По мере продвижения тайфуна Mindulle на северо-восток наблюдается ослабление экмановской накачки.

Анализ часовых изменений температуры и солёности показывает, что к югу от центра циклона преобладают отрицательные аномалии, образующие протяжённые зоны с зональной ориентацией. На северной периферии циклона наблюдаются ограниченные по пространственному масштабу области с положительными приращениями. Таким образом, термический след тайфуна характеризуется чередованием областей как положительных, так и отрицательных температурных аномалий, что свидетельствует о сложном взаимодействии динамических и термодинамических процессов в системе «атмосфера – океан».

Для солёности картина более сложная: в поверхностном слое океана наблюдается преобладание отрицательных аномалий на южной периферии циклона. Так, для солёности наблюдается чередование языков с положительными и отрицательными значениями аномалий.

Расчёты термохалинных аномалий относительно средних значений, оценённых за период 1–4 октября 2021 г., включающий даты прохождения циклона вдоль Курильской гряды, в целом подтверждают выводы, полученные для почасовых термохалинных аномалий, вычисленных как приращения значений за период 1 ч. Однако эти аномалии демонстрируют значительное охлаждение поверхностного слоя океана в области за траекторией движения тайфуна. Можно отметить, что динамические изменения более выражены, чем термохалинные.

В центре Mindulle изменения скорости, температуры незначительны по сравнению с периферией циклона, где эти изменения весьма велики. Указанная особенность проявляется как в поверхностном слое, так и на глубине.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (шифр проекта № 129659573), гранта Российского научного фонда № 25-17-00021 и государственного задания Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва ДВО РАН «Фундаментальные основы адаптационных стратегий развития экосистем в условиях глобальных климатических изменений».

## Литература

1. Григоркина Р. Г., Фукс В. Р. Воздействие тайфунов на океан. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 243 с.
2. Мамедов Э. С., Павлов Н. И. Тайфуны. Л.: Госметеиздат, 1974. 142 с.

3. Chai F., Wang Y., Xing X. et al. A limited effect of sub-tropical typhoons on phytoplankton dynamics // *Biogeosciences*. 2021. V. 18. P. 849–859. DOI: 10.5194/bg-18-849-2021.
4. Heinze C., Michel C., Torsvik T. et al. More frequent abrupt marine environmental changes expected // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. No. 2. Article e2023GL106192. DOI: 10.1029/2023GL106192.
5. Lellouche J.-M., Greiner E., Bourdallé-Badie R. et al. The Copernicus global 1/12° oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. Article 698876. DOI: 10.3389/feart.2021.698876.
6. Li Y., Tang Y., Wang S. et al. Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global off-shore regions // *Nature Communications*. 2023. V. 14. Article 5167. DOI: 10.1038/s41467-023-40605-2.
7. Mei W., Xie S.-P., Primeau F. et al. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures // *Science Advances*. 2015. V. 1. No. 4. Article e1500014. DOI: 10.1126/sciadv.1500014.

## Ocean response to the passage of Pacific typhoons in extratropical latitudes

A. V. Bernado<sup>1</sup>, T. V. Belonenko<sup>1</sup>, M. V. Budyansky<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

The study explores changes in key oceanographic parameters during the passage of Super Typhoon Mindulle (No. 202116) whose trajectory traversed the Kuril-Kamchatka trench. Analysis utilized GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis) oceanographic reanalysis data supplemented by satellite imagery and ERA5 (ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> Generation) atmospheric reanalysis. Maximum ocean current speeds (>2 m/s) were observed at the typhoon's southeastern periphery, shifting eastward as the typhoon moved northeast, which indicated its sustained and expanding influence. The most intense upwelling, driven by Ekman pumping, occurred at the western periphery due to wind field asymmetry, weakening as the cyclone progressed. Temperature anomalies were predominantly negative south of the cyclone's center, with limited areas of positive anomalies at the northern periphery. Salinity anomalies exhibited a more complex pattern with alternating zones of positive and negative values. Comparison of hourly and daily-averaged anomalies confirmed significant ocean cooling behind the typhoon's path, with dynamic changes more pronounced than thermohaline changes. Within the cyclone's center, changes in current speeds and thermohaline properties were minimal compared to the periphery, both at the surface and in vertical slices. The results confirm the effectiveness of using GLORS12V1 data to investigate short-term typhoon-induced oceanic processes.

**Keywords:** typhoon, oceanographic field variability, ocean current velocity, water temperature, salinity, Ekman pumping, Kuril Islands, satellite data, GLORYS12V1, ERA5

Accepted: 30.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-254-267

## References

1. Grigorkina R. G., Fuks V. R., *Vozdeistvie taifunov na ocean* (The impact of typhoons on the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 243 p. (in Russian).
2. Mamedov E. S., Pavlov N. I., *Taifuny* (Typhoons), Leningrad: Gosmeteoizdat, 1974, 142 p. (in Russian).
3. Chai F., Wang Y., Xing X. et al., A limited effect of sub-tropical typhoons on phytoplankton dynamics, *Biogeosciences*, 2021, V. 18, pp. 849–859, DOI: 10.5194/bg-18-849-2021.
4. Heinze C., Michel C., Torsvik T. et al., More frequent abrupt marine environmental changes expected, *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, No. 2, Article e2023GL106192, DOI: 10.1029/2023GL106192.

5. Lellouche J.-M., Greiner E., Bourdallé-Badie R. et al., The Copernicus global 1/12° oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis, *Frontiers in Earth Science*, 2021, V. 9, Article 698876, DOI: 10.3389/feart.2021.698876.
6. Li Y., Tang Y., Wang S. et al., Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global off-shore regions, *Nature Communications*, 2023, V. 14, Article 5167, DOI: 10.1038/s41467-023-40605-2.
7. Mei W., Xie S.-P., Primeau F. et al., Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures, *Science Advances*, 2015, V. 1, No. 4, Article e1500014, DOI: 10.1126/sciadv.1500014.