

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ОХОТСКОГО МОРЯ В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД

И. В. Шумилов¹, В. М. Пищальник^{1,2}, В. А. Романюк², И. В. Никулина¹

¹ *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б,
e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru;*

² *ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет,
Россия, 693008, Южно-Сахалинск, Коммунистический проспект, д. 33,
e-mail: vpishchalnik@rambler.ru*

В настоящей работе представлены результаты анализа взаимосвязей между характеристиками атмосферной циркуляции и ледовитостью Охотского моря, включая воздействие циклонов, за период 2001–2020 гг. Исследование основано на данных модели реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, а также на пентадных картах сплоченности ледяного покрова и картах приземного анализа Японского метеорологического агентства. В ходе проведенного анализа выявлено, что в >87 % случаев циклонического воздействия на акваторию Охотского моря наблюдается уменьшение скорости роста площади льда не менее, чем на 10 %, хотя бы в одном из регионов моря (северо-западном, северо-восточном или южном), при этом из них >52 % приходится на центральный тип циклонического воздействия и >35 % – на южный. Дана оценка интенсивности воздействия циклонов на ледяной покров в период его осенне-зимнего развития с учетом типизации сезонов по суровости ледовых условий. Вычислены внутрисезонные максимумы замедления роста ледовитости в периоды прохождения циклонов. Выявлены взаимосвязи *u*-компоненты ветра и среднеквадратического отклонения приземного давления со скоростью изменения площади льда для Охотского моря в целом и его отдельных регионов. Выделены наибольшие отклонения между средними значениями показателей атмосферной циркуляции в условиях наличия циклонического воздействия центрального или южного типа на акваторию и без него, в частности, для *u*- и *v*-компонент ветра, скорости ветра, приземного давления и его среднеквадратического отклонения. Анализ показателей атмосферной циркуляции и параметров ледового режима позволил количественно оценить вклад различных атмосферных процессов в формирование ледяного покрова, что способствует развитию новых подходов к прогнозированию ледовой обстановки.

Ключевые слова: Охотское море, ледяной покров, атмосферная циркуляция, циклоны, циклоническая активность, статистический анализ, дистанционное зондирование

Введение

Особенностью атмосферной циркуляции над Азиатско-Тихоокеанским регионом (АТР) в осенне-зимний период является взаимодействие основных центров действия атмосферы – алеутской депрессии и сибирского антициклона, между которыми формируется зона повышенных барических градиентов. В южной части АТР

отмечаются наибольшие перепады давления и значительные различия в температурах воздушных масс, что обуславливает наличие над северо-западной частью Тихого океана области наиболее активного циклогенеза, из которой циклоны следуют в район алеутской депрессии по двум основным направлениям – на запад и восток Берингова моря. Часть циклонов при этом перемещается с континента на акваторию Охотского моря (Глебова, 2018).

В зимний период над Охотским морем преобладает муссонный тип циркуляции атмосферы, образующийся под воздействием азиатского антициклона и алеутской депрессии. Действие воздушных потоков северо-западного и северного направлений отмечается с сентября в северной части моря. Устойчивый перенос воздушных масс с континента на акваторию наблюдается с октября и сохраняется до мая (Дашко, 1979, 1998). Проходящие над Охотским морем циклоны вызывают изменение ветрового режима, в зависимости от типа атмосферной циркуляции. Глубокие циклоны, проходя над морской поверхностью, оказывают значительное динамическое воздействие на верхний слой воды и ледяной покров, что сопровождается снижением ледовитости до минимального уровня (Глебова, 2018). Таким образом, характер атмосферной циркуляции играет весьма существенную роль в формировании климатического режима Охотского моря.

Прохождение циклона над акваторией сопровождается усилением ветра, который передает импульс ледяному покрову через трение на границе «атмосфера–лед», что приводит к дрейфу льда, его сжатию и деформации. Образовавшиеся разводья в свою очередь увеличивают область контакта льда с открытой водой, что обуславливает разрушение льда. Наиболее сильная деформация отмечается в прибрежной зоне, приводя к образованию стамух, быстрому формированию припая и торосов, толщина льда значительно увеличивается в результате его наслоения. Воздействие циклонов часто приводит к нарушению процесса генерального дрейфа морского льда из северо-западного региона моря в южный. Кроме того, интенсивный дрейф сопровождается смещением кромки ледяного покрова и увеличением открытых пространств воды в прикромочной зоне. Кратковременные изменения ледовитости могут достигать 10 % от площади моря (площадь Охотского моря составляет 1603.2 тыс. км²) (Пищальник и др., 2015).

Материал и методы исследования

В качестве основного источника информации о ледяном покрове использовались публикуемые в открытом доступе карты-схемы сплоченности морского льда Японского метеорологического агентства (ЈМА) (www.data.jma.go.jp). Архивы ЈМА представлены в виде коллекций пентадных карт-схем с разрешением 512×512 пикселей. Области, покрытые льдом, обозначаются в четырех цветовых градациях, отражающих уровень сплоченности ледяного покрова согласно номенклатуре морских льдов (WMO, 2014). Обработка исходных данных, вычисление значений площади ледяного

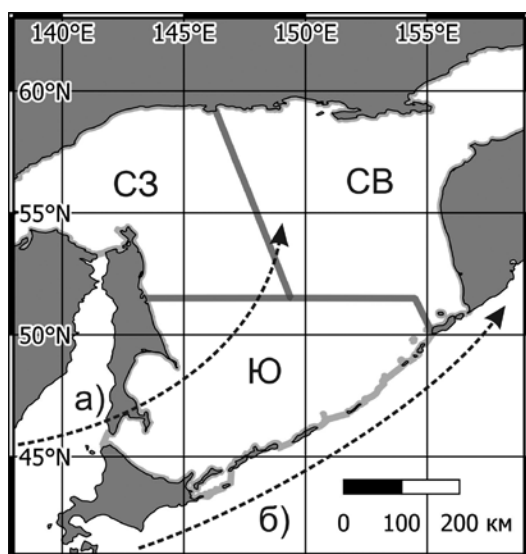


Рис. 1 – Схема районирования Охотского моря: северо-западный (СЗ), северо-восточный (СВ) и южный (Ю) регионы. Стрелки указывают траектории прохождения циклонов – «центральных» (а) и «южных» (б)

покрова и построение карт распределения льда осуществлялось с помощью разработанного программного обеспечения “Ice Data Processing” (Шумилов и др., 2023).

В ходе исследования были вычислены пентадные значения показателей площади льда (s), скорости ее изменения (s') и ускорения изменения (s'') в период осенне-зимнего развития ледяного покрова (с 6 ноября по 5 марта) за сезоны 2001–2020 гг., (всего 20 сезонов по 24 пентады). Вычисление показателей площади льда производилось с учетом районирования Охотского моря по ледово-географическим признакам: по всей акватории моря и ее отдельным регионам – северо-западному, северо-восточному и южному (Pishchalnik et al., 2013; Минервин, 2015; Романюк, 2019) (рисунок 1).

В качестве основных параметров атмосферной циркуляции для анализа использовались u - и v -компоненты ветра, приземное давление и его среднеквадратическое отклонение за период 2001–2020 гг. Показатель u -компоненты – зональная составляющая ветра (движение воздуха с запада на восток или в обратном направлении); показатель v -компоненты – меридиональная составляющая ветра (движение воздуха с юга на север или в обратном направлении). Приземное давление и его среднеквадратическое отклонение (СКО) рассматривались в качестве показателей, отражающих интенсивность ветра и циклонической активности.

Одним из основных источников ветровых параметров являются результаты модели реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) (www.ecmwf.int). Данные доступны с 1950 г. и имеют глобальное покрытие всех регионов Земли. Выбор реанализа ERA5 обусловлен его высоким пространственным разрешением (0.25° по широте и долготе) и современными методами ассимиляции данных, что позволяет корректно идентифицировать барические образования, их центры и траектории. Более точное воспроизведение мезомасштабных процессов в высоких широтах, по сравнению с предыдущими глобальными реанализами (ERA-Interim, JRA-55, NCEP/NCAR), подтверждается рядом валидационных исследований, самим ECMWF и независимыми научными коллективами. Таким образом, для задач данного исследования, в том числе детального анализа полей давления, ветра и идентификации циклонов, ERA5 на текущий момент является подходящим и современным источником. Исходные данные приводились к пентадной временной дискретности, обработка файлов, вычисление средних значений параметров по акватории Охотского моря и его

регионам, построение карт на основе выбранных показателей атмосферной циркуляции осуществлялось с помощью программного обеспечения “NetCDF Processing” (Шумилов и др., 2024).

Для анализа циклонической активности в исследуемом регионе были использованы коллекции карт приземного анализа АТР, публикуемые ежедневно (4 раза в сутки) в открытом доступе JMA, и построенные на основе данных модели ERA5 карты приземного давления (рисунок 2). На картах отражены изобары атмосферного давления, атмосферные фронты и центры действия атмосферы. Проанализированы данные за сезоны 2001–2020 гг. и построены пентадные ряды типа циклонического воздействия на акваторию Охотского моря. Анализ траекторий прохождения циклонов производился путем ручной обработки карт приземного анализа.

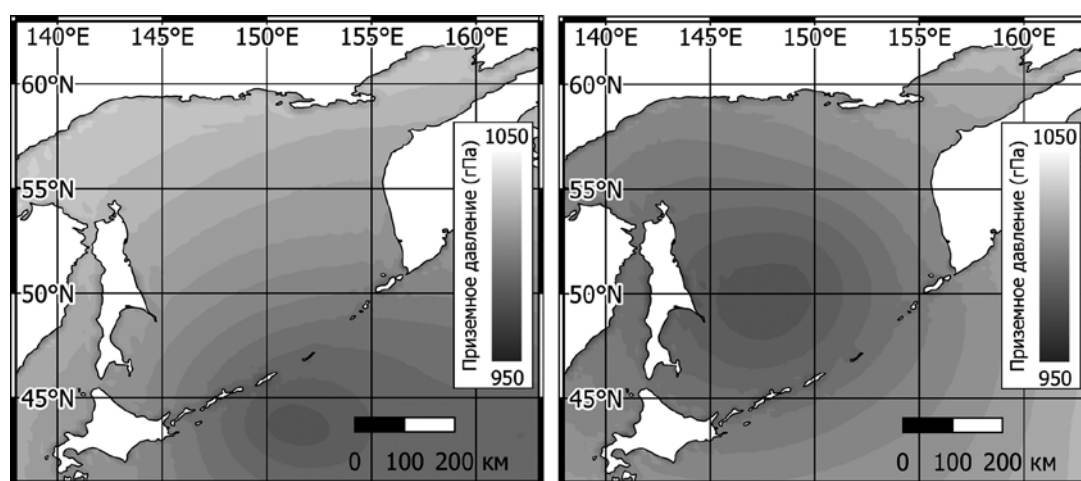


Рис. 2 – Циклоническое воздействие южного типа на 20.01.2016 (слева) и центрального типа на 04.12.2010 (справа) (карты приземного давления на основе данных модели реанализа ERA5)

Совместное использование ERA5 и карт приземного анализа JMA позволило корректно идентифицировать циклоны и сопоставить их характеристики с особенностями ледового режима. Полученные результаты согласуются с выводами, представленными в работе Глебовой (2018), в частности о ведущей роли циклогенеза в районе алеутской депрессии, а также перемещении циклонов с континента и акватории Японского моря через акваторию Охотского моря по направлению к алеутской депрессии. В данном исследовании была использована методика, схожая с применяемой в оперативной практике JMA, которая заключается в ручном анализе карт приземного барического поля. Совместное использование объективных данных реанализа ERA5 и карт приземного анализа JMA, на которых отражены центры циклонов и атмосферные фронты, позволило корректно идентифицировать циклоны и типизировать их воздействие (центральное и южное) на акваторию Охотского моря. Примененный подход позволил произвести детальную количественную оценку воздействия циклонов разных типов на темпы развития ледяного покрова. В качестве критерия при определении

типа циклонического воздействия использовалось местоположение центра проходящего циклона относительно Охотского моря и прилегающих акваторий:

1) прохождение центра циклонического вихря над акваторией Охотского моря в районе 50–55° с. ш. отнесено нами к «центральному» типу (рисунки 1, 2);

2) положение центра в районе южной, юго-восточной или восточной границы Охотского моря (о. Хоккайдо, Курильские о-ва, п-ов Камчатка) – отнесено к «южному» типу (рисунки 1, 2).

На основе показателей скорости изменения площади ледяного покрова s' и ускорения изменения s'' были вычислены ряды выявленных случаев замедления роста площади льда в северо-западном, восточном и южном регионах моря в периоды циклонической деятельности. Отдельно анализировались центральные и южные типы циклонов. Под критерием замедления роста площади льда в пентаду i принималось соблюдение одного из следующих условий:

$$s'_i \leq 0, \quad (1)$$

учитывающего уменьшение площади льда;

$$s''_i \leq 0, 1s'_{i-1}, \quad (2)$$

учитывающего уменьшение скорости роста площади льда на 10 % или более.

Для оценки влияния циклонов на ледовитость были получены средние за период 2001–2020 гг. показатели замедления роста площади льда, путем вычисления средних значений s'' (ускорения изменения площади льда), учитывая значения s'' только в пентады, соответствующие вышеописанным условиям замедления роста площади льда (формулы 1 и 2) и условию наличия циклонического воздействия на акваторию. Значения вычислялись отдельно для северо-западного, северо-восточного, южного регионов, всех регионов в сумме и Охотского моря в целом в период с 11 ноября по 5 марта для сезонов 2001–2020 гг. Выбор начала периода обусловлен необходимостью вычисления величины s'' . Для южного региона расчеты производились с 1 декабря по 5 марта, так как здесь основная фаза роста ледовитости начинается с задержкой относительно остальных регионов – в начале декабря.

Для сопоставления условий с наличием и отсутствием циклонического воздействия рассчитывались относительные отклонения метеорологических параметров по формуле:

$$\Delta X = \frac{X_n - X_c}{X_n} * 100 \%, \quad (3)$$

где X_c – значение соответствующего метеорологического параметра при наличии циклонического воздействия, X_n – значение без циклонического воздействия. Такой подход позволяет выявить направление и относительную величину изменения параметра. Следует учитывать, что при малых фоновых значениях в условиях без циклона относительные отклонения могут достигать больших величин, что не отражает кратного усиления, а связано с особенностями нормировки. При интерпретации основное внимание уделялось знаку и общей тенденции изменений.

Для типизации сезонов по суровости ледовых условий использовался подход на основе среднеквадратического отклонения (критерий 0.8σ) показателя средней площади ледяного покрова в осенне-зимний период: от -0.4σ до $+0.4\sigma$ – умеренные зимы, от $\pm 0.4\sigma$ до $\pm 1.2\sigma$ – соответственно мягкие (–) или суровые (+), от ± 1.2 – экстремально мягкие (–) или экстремально суровые (+) (Спичкин, 1987; Думанская, 2017). Суровые и экстремально суровые зимы, а также мягкие и экстремально мягкие, объединялись в один тип.

Результаты исследования

Количественное распределение случаев циклонического воздействия на акваторию Охотского моря и случаев замедления роста площади ледяного покрова (при условии наличия действующего циклона) представлено на рисунке 3. Сравнение распределения значений наглядно отражает согласованность и взаимосвязь количества зафиксированных циклонов и замедления роста площади льда. В течение осенне-зимнего периода доминирует циклоническое воздействие центрального типа с максимальной повторяемостью в начале ледового сезона (11–15 ноября), за весь исследуемый период зафиксировано 14 случаев. Такая активность способствует сдерживанию интенсивного прироста площади льда, особенно в северо-западном регионе моря, где располагается основной центр ледообразования.

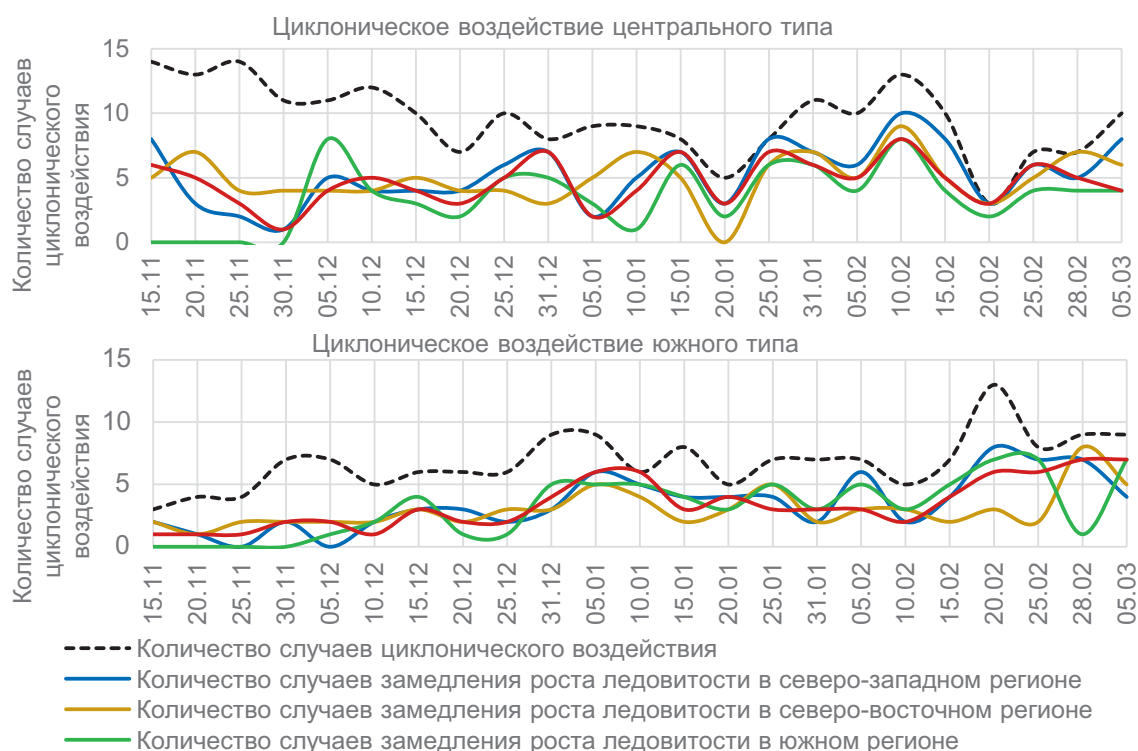


Рис. 3 – Сравнение количества случаев циклонического воздействия на акваторию Охотского моря и количества случаев замедления роста площади ледяного покрова (15 ноября – 5 марта) 2001–2020 гг.

Постепенное снижение количества случаев циклонического воздействия наблюдается к 16–20 января (5 случаев), а с конца января и в феврале снова отмечается резкий рост (до 6–13 случаев) с локальным максимумом на 6–10 февраля (20 случаев). В пентаду 16–20 февраля зафиксирована минимальная повторяемость (3 случая). С конца февраля и до 5 марта (сезонный максимум площади ледяного покрова) снова наблюдается увеличение числа случаев до 7–10.

Южные циклоны проявляют возрастающую активность с конца ноября и достигают максимума в феврале (до 13 случаев на 16–20 февраля). Отклонения числа случаев циклонического воздействия южного типа от количества случаев замедления роста ледовитости, особенно на начальной фазе развития ледяного покрова, объясняются его малой площадью и физико-географическими особенностями южного региона, где лед появляется значительно позже, чем в северной части моря. Кроме того, замедление роста площади льда в масштабах рассматриваемых регионов зависит от интенсивности, местоположения и продолжительности воздействия вихря.

Согласно данным таблицы 1, совпадения между случаями наличия циклона и замедления роста площади льда фиксируются в 87.4 % пентад, при условии замедления роста хотя бы в одном из трех регионов. При этом циклоны центрального типа вносят наибольший вклад – 52.1 %, южного – 35.2 %. Значения данного показателя при учете всех регионов значительно отличаются от Охотского моря в целом, так как процессы изменения ледовитости в отдельных регионах могут идти разнонаправленно и компенсировать друг друга. На региональном уровне доля совпадений также значительна и составляет от 49.0 до 55.3 %, что подчеркивает пространственную согласованность атмосферного влияния. Полученные результаты подтверждают высокую степень синхронности процессов атмосферного и ледового режимов.

Табл. 1 – Процент совпадений между случаями наличия циклона и замедления роста площади льда Охотского моря (2001–2020 гг.)

Тип циклонического воздействия	Охотское море	Северо-запад	Северо-восток	Юг	Все регионы
Центральное	29.2	33.3	30.5	27.2	52.1
Южное	21.4	22.1	18.5	24.8	35.2
Любое	50.6	55.3	49.0	52.0	87.4

На рисунке 4 представлены усредненные значения замедления роста площади льда, сгруппированные по типу циклонического воздействия. Начало значимого замедления роста ледовитости наблюдается после 26–30 ноября, что связано с активной сезонной генерацией молодого льда, который может подвергаться разрушению при воздействии циклонов. Интенсивность замедления роста ледовитости при центральных циклонах достигает максимума в феврале: до –51.8 тыс. км² на 6–10 февраля с учетом всех регионов. Локальные максимумы зафиксированы на 26–31 декабря, 11–15 января, 21–25 февраля и 26–28 февраля со средними значениями от –28.5 до –47.1 тыс. км².

В период декабрьского максимума наибольший вклад в замедление темпа роста площади льда вносится северо-западным регионом, в остальные максимумы вклад отдельных регионов более сбалансирован по абсолютной величине. Прохождение центральных циклонов сопровождается значительным замедлением роста ледовитости во всех трех регионах моря, в особенности во второй половине периода осенне-зимнего развития ледяного покрова (с конца января). Для циклонического воздействия южного типа характерны пиковые значения замедления роста ледовитости при учете всех регионов в начале и середине февраля: 1–5 февраля (–31 тыс. км²) и 16–20 февраля (–38.6 тыс. км²), при этом основное влияние наблюдается в южном и северо-западном регионах.

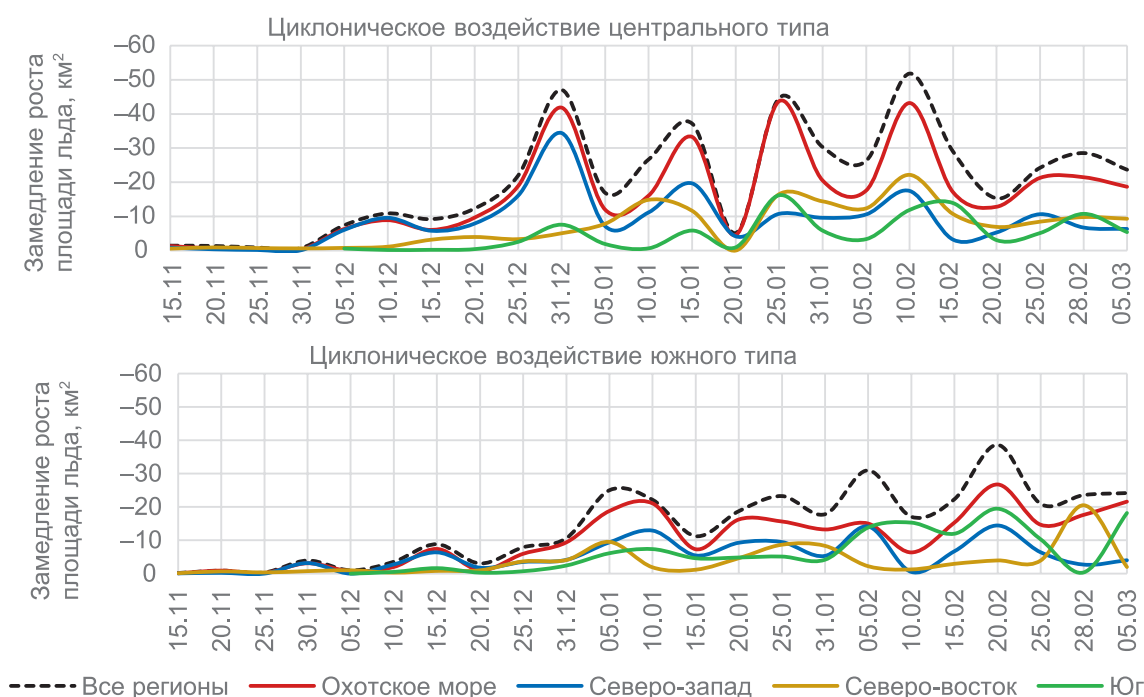


Рис. 4 – Среднее значение показателя замедления роста площади льда при центральном и южном циклоническом воздействии на ледяной покров Охотского моря и его регионов в осенне-зимний период (15 ноября – 5 марта) 2001–2020 гг.

В таблице 2 представлена типизация зим по суровости ледовых условий в Охотском море и его отдельных регионах для периода 2001–2020 гг. Как основным показателем использовано среднее значение площади ледяного покрова в осенне-зимний период с 5 ноября по 5 марта.

Среднемноголетнее число случаев циклонического воздействия в осенне-зимний период (1 ноября – 5 марта) для любых циклонов составило 19 случаев, для циклонического воздействия центрального типа – 11, для циклонического воздействия южного типа – 8. Как показано на рисунке 5, после сезона 2006–2007 гг. частота циклонического воздействия центрального типа заметно увеличилась, что согласуется с типизацией зим по суровости ледовых условий (таблица 2): с сезона 2000–2001 гг. по сезон 2006–2007 гг. в Охотском море наблюдались суровые зимы (за исключением 2004–2005

и 2005–2006 гг.), а после данного периода – только умеренные и мягкие (суровые – только в отдельных регионах моря). В частности, в экстремально суровую зиму 2000–2001 гг. (многолетний максимум) число случаев любого циклонического воздействия составило –42.4 % от среднего значения, а для центрального типа воздействия – –56.1 %, что для обоих показателей является минимумом за весь период 2001–2020 гг. В суровый сезон 2003–2004 гг. наблюдался максимум случаев циклонического воздействия южного типа (+77.2 %), что могло способствовать смягчению ледовых условий (умеренный тип зимы) в северо-восточном и южном регионах моря. В экстремально мягкий сезон 2005–2006 гг. общая частота циклонической активности была пониженной (–29.8 %), однако число случаев воздействия южного типа выше среднего (+26.6 %). Резкое повышение частоты южного циклонического воздействия в сезон 2014–2015 гг. (+51.9 %) могло также стать одной из причин экстремально мягкой зимы и наступления многолетнего минимума ледовитости в Охотском море.

Табл. 2 – Средняя площадь ледяного покрова Охотского моря и его отдельных регионов в тысячах км² (5 ноября – 5 марта) 2001–2020 гг. Белым цветом выделены мягкие зимы, светло-серым – умеренные, темно-серым – суровые

	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Охотское море	765.6	581.9	607.4	550.7	461.0	364.2	555.9	506.5	400.7	444.2
Северо-запад	293.5	252.8	246.8	275.5	219.3	153.9	261.1	236.2	191.3	198.6
Северо-восток	282.8	212.0	203.1	157.8	147.1	125.1	185.3	153.1	125.9	153.6
Юг	189.3	117.2	157.5	117.4	94.6	85.3	109.5	117.2	83.5	92.0
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Охотское море	393.2	523.7	463.9	409.6	352.2	484.2	526.6	478.3	511.9	504.5
Северо-запад	190.2	231.5	204.7	184.8	168.0	193.8	259.0	246.9	210.2	225.4
Северо-восток	127.4	183.9	137.9	117.7	124.4	201.9	133.1	111.2	166.1	145.9
Юг	75.6	108.3	121.3	107.1	59.9	88.5	134.5	120.2	135.6	133.2



Рис. 5 – Сравнение относительного отклонения от среднего числа случаев циклонического воздействия и средней площади ледяного покрова Охотского моря в осенне-зимний период (1 ноября – 5 марта) 2001–2020 гг.

Корреляционный анализ выявил значимые связи между компонентами ветра и скоростью изменения площади льда s' (таблица 3). Особенно выражено влияние u -компоненты (западная-восточная составляющая): для всего моря с коэффициентом корреляции 0.43, северо-западного региона (0.51), южного (0.41). Эти зависимости отражают ключевую роль северо-западного ветрового переноса, обеспечивающего дрейф льда из северо-западного центра генерации льда в южном направлении.

Табл. 3 – Коэффициенты корреляции показателей u - и v -компонент ветра и скорости изменения площади ледяного покрова по регионам Охотского моря (2001–2020 гг.)

	Компонента ветра	Охотское море		Северо-запад		Северо-восток		Юг	
		u	v	u	v	u	v	u	v
Скорость изменения площади льда (s')	Охотское море	0.43	–0.23	0.46	–0.04	0.34	–0.20	0.28	–0.34
	Северо-запад	0.46	–0.12	0.51	0.03	0.39	–0.07	0.26	–0.23
	Северо-восток	0.12	–0.29	0.15	–0.07	0.19	–0.30	–0.07	–0.34
	Юг	0.31	–0.10	0.31	–0.06	0.11	–0.06	0.41	–0.15

В случае ослабления северного ветра интенсивность дрейфа уменьшается и рост площади льда замедляется или становится отрицательным. Наличие повышенного коэффициента корреляции u -компоненты для Охотского моря подтверждает важность вклада северо-западного региона в общую тенденцию развития ледяного покрова на всей акватории.

Для v -компоненты (южная-северная составляющая) зафиксированы умеренные отрицательные корреляции, особенно в южном (–0.34) и северо-восточном (–0.30) регионах, что указывает на важность учета изменчивости скорости ветра в направлении север-юг как одного из определяющих факторов интенсивности дрейфа льда из северо-восточного центра генерации в южном направлении. Вычисленные коэффициенты корреляции являются значимыми и превосходят соответствующее критическое значение корреляции Пирсона 0.06 при уровне доверия 95 % для ряда длиной в 240 значений (Андерсон, 1976).

Значения коэффициентов корреляции таблицы 4 подтверждают обратную взаимосвязь между СКО приземного давления и скоростью роста площади льда s' . Максимальные коэффициенты выявлены в северо-западном (–0.41) и северо-восточном (–0.37) регионах, что отражает чувствительность этих районов к изменениям интенсивности циклонической активности, а также указывает на определяющую роль режима атмосферной циркуляции для процессов генерации и дрейфа льда в осенне-зимний период.

Рост показателя СКО говорит об усилении барических градиентов и повышении циклонической активности, способствующей снижению темпов роста ледовитости. Вычисленные коэффициенты корреляции являются значимыми и превосходят соответствующее критическое значение корреляции Пирсона 0.06 при уровне доверия 95 % для ряда длиной в 240 значений.

Табл. 4 – Коэффициенты корреляции показателей стандартного отклонения приземного давления и скорости изменения площади ледяного покрова по регионам Охотского моря (2001–2020 гг.)

	Стандартное отклонение приземного давления	Охотское море	Северо-запад	Северо-восток	Юг
Скорость изменения площади льда (s^{-1})	Охотское море	–0.36	–0.39	–0.46	–0.04
	Северо-запад	–0.33	–0.41	–0.46	–0.05
	Северо-восток	–0.24	–0.30	–0.37	0.00
	Юг	–0.19	–0.09	–0.10	–0.03

На рисунке 6 сопоставлены показатели атмосферной циркуляции при различных типах циклонического воздействия. Пентадные значения (6 ноября – 5 марта) u -, v -компонент ветра, скорости ветра, угла направления ветра, приземного давления. СКО приземного давления были разделены на группы с учетом типа циклонического воздействия на акваторию, затем вычислены их средние значения.

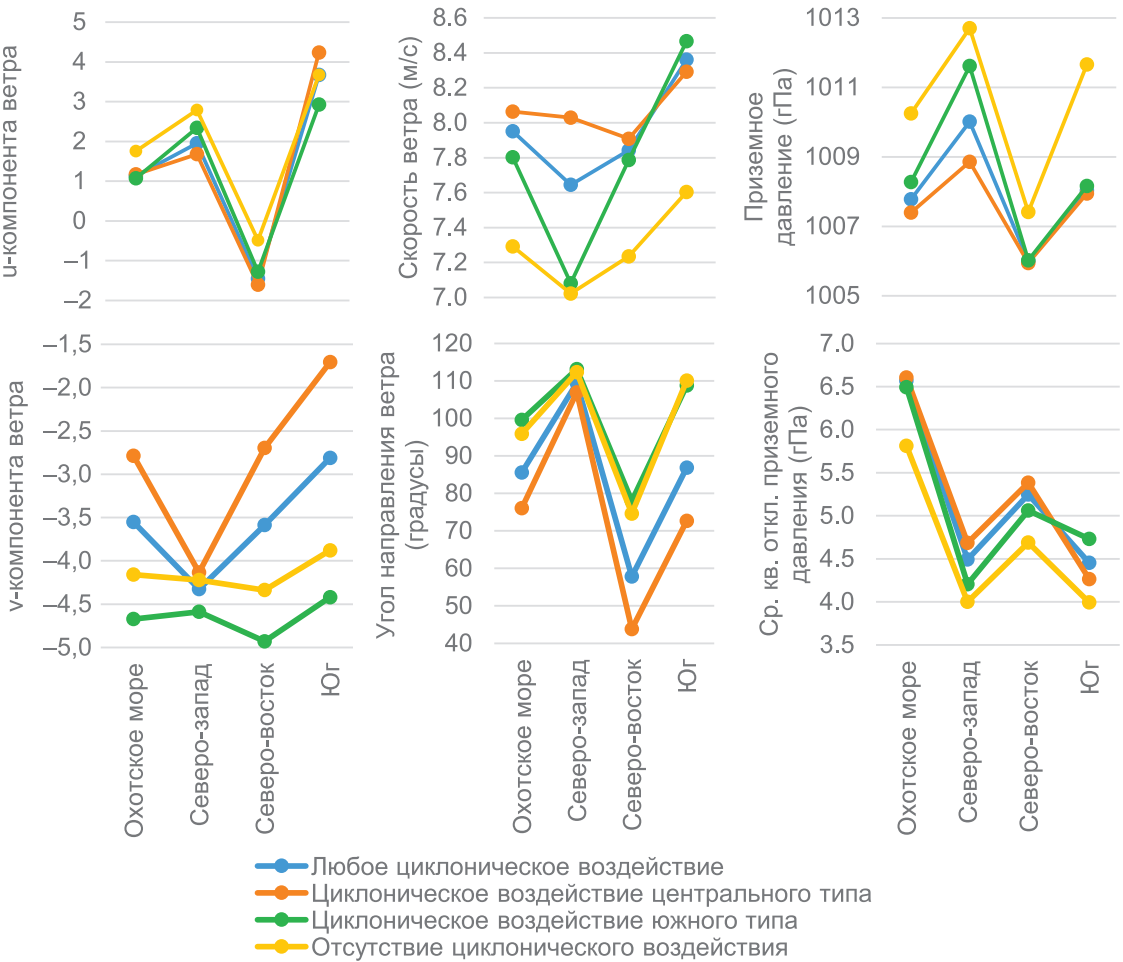


Рис. 6 – Сопоставление средних значений показателей атмосферной циркуляции, разделенных по группам пентад в соответствии с типом циклонического воздействия на акваторию Охотского моря (2001–2020 гг.)

Анализ распределения параметров выявил существенные различия в режимах атмосферной циркуляции между группами и регионами. Наибольшие отклонения наблюдаются при сравнении условий без циклонического влияния и с ним. На рисунке 6 видно, что при отсутствии циклонического воздействия средние значения u -компоненты выше, чем при его наличии. Поскольку положительные значения показателя соответствуют западным ветрам, снижение u -компоненты при прохождении циклона указывает на ослабление устойчивого муссонного переноса, который формируется преимущественно северными и северо-западными ветрами.

При центральном типе циклонического воздействия наблюдается общее снижение u -компоненты, рост v -компоненты и повышение средней скорости ветра. В среднем по всему морю u -компонента ветра уменьшается на 33.3 %, что отражает усиление ветра западных направлений. Особенно сильное снижение наблюдается в северо-восточном регионе (–229.8 %). Следует отметить, что столь большие относительные величины связаны с малым средним фоновым значением u -компоненты в этом регионе при отсутствии циклонической активности. Увеличение v -компоненты ветра составляет 56 % в южном регионе и 37.9 % в северо-восточном, что демонстрирует значительное ослабление северных ветров, связанное с прохождением циклона через центральную часть акватории. Это нарушает условия дрейфа и способствует разрушению ледяного покрова. Скорость ветра возрастает на 10.6 % в целом по морю, достигая 14.3 % в северо-западной части, что указывает на усиление турбулентности и интенсивности механического воздействия на лед. Приземное давление снижается на 2.8 гПа по морю, с максимальным уменьшением в северо-западном регионе (до 3.8 гПа), что соответствует барическому центру циклона. СКО приземного давления увеличивается в среднем по всему морю на 13.7 %, при этом в северо-западном регионе отклонение достигает 17.1 %. Это указывает на значительные колебания давления и скорости ветра, а также на наличие или усиление циклонов над акваторией моря и вблизи ее границ.

При южном типе циклонической активности отклонения показателей выражены иначе. Установлено снижение u -компоненты в целом по морю (38.8 %) и в северо-восточном регионе (162.3 %), что также указывает на усиление ветра западного направления. Уменьшение значения v -компоненты происходит по всем регионам, но меньше (до 14 %), чем при центральных циклонах. Скорость ветра повышается на 11.3 % в южном регионе, где циклоническое воздействие проявляется наиболее интенсивно. Приземное давление снижается в целом по морю на 2 гПа с наибольшим отклонением в южном регионе (3.5 гПа). СКО приземного давления возрастает в целом по морю до 11.7 % с наибольшим значением в южном регионе (18.5 %), что отражает снижение устойчивости атмосферных процессов и усиление циклонической активности вдоль южной границы акватории моря.

Заключение

Циклоны центрального и южного типа по-разному влияют на ледовитость и пространственно-временную динамику процесса ледообразования в различных регионах акватории Охотского моря. Циклоническое воздействие южного типа чаще препятствует формированию устойчивого ледяного покрова в южном регионе моря (уменьшая скорость роста ледовитости в 24.8 % случаев), а воздействие центрального типа главным образом ограничивает рост площади льда в северо-западном регионе (33.3 % случаев). Полученные результаты демонстрируют тесную взаимосвязь между типом циклонического воздействия и параметрами ледового режима.

Основные выводы по полученным результатам:

1. Установлено, что в 87.4 % случаев циклонического воздействия на акваторию Охотского моря наблюдается замедление роста площади льда не менее чем на 10 % хотя бы в одном из регионов моря (северо-западном, северо-восточном или южном), при этом из них 52.1 % приходится на центральный тип циклонического воздействия, 35.2 % – на южный.

2. Внутрисезонные максимумы средней интенсивности циклонического воздействия центрального типа на ледяной покров Охотского моря вычислены на 26–31 декабря, 11–15 января, 6–10 февраля и 21–28 февраля со средним значением уменьшения скорости роста площади льда от –28.5 до –51.8 тыс. км². Для циклонического воздействия южного типа выделены характерные максимумы на 1–5 февраля (–31 тыс. км²) и 16–20 февраля (–38.6 тыс. км²), при этом южный и северо-западный регионы вносят наибольший вклад в значение показателя.

3. Выявлены статистически значимые взаимосвязи между скоростью изменения площади льда и метеорологическими параметрами: *u*-компонента ветра показывает умеренные положительные корреляции (коэффициенты 0.43 для всей акватории, 0.51 для северо-западного и 0.41 для южного регионов); среднее квадратическое отклонение приземного давления демонстрирует умеренные отрицательные корреляции (коэффициенты –0.36 для акватории в целом, –0.41 для северо-западного и –0.37 для северо-восточного регионов).

4. Установлены наибольшие отклонения между значениями средних показателей атмосферной циркуляции в условиях наличия циклонического воздействия центрального типа на акваторию и без него: *u*-компонента ветра (229.8 %) в северо-восточном регионе; *v*-компонента ветра (56 %) и приземное давление (3.7 гПа) в южном регионе; скорость ветра (14.3 %), приземное давление (3.8 гПа) и его среднее квадратическое отклонение (17.1 %) в северо-западном регионе.

5. Выявлены наибольшие отклонения между значениями показателей атмосферной циркуляции в условиях наличия циклонического воздействия южного типа на акваторию и без него: *u*-компонента ветра (162.3 %) в северо-восточном регионе; скорость ветра (11.3 %), приземное давление (3.5 гПа) и его среднее квадратическое отклонение (18.5 %) в южном регионе.

Таким образом, полученные результаты являются основой для дальнейшего уточнения параметров атмосферных процессов для учета в ледовых моделях, а также для повышения точности долгосрочных и краткосрочных внутрисезонных прогнозов ледовитости с учетом региональных особенностей моря.

Благодарности. Исследование выполнялось и финансировалось в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM–2024–0002) и государственного задания Сахалинского государственного университета (FEFF–2024–0004) «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий».

Список литературы

1. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 755 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007734334/
2. *Глебова С. Ю.* Циклоны над Тихим океаном и дальневосточными морями в холодные и теплые сезоны и их влияние на ветровой и термический режим в последний двадцатилетний период // Известия ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 153–166. EDN: [XWBMQN](https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
3. *Дашко Н. А.* Особенности зимнего режима ветров на Охотском море // Труды Гидрометцентра СССР. 1979. Вып. 216. С. 110–119. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009375012/
4. *Дашко Н. А.* Метеорологический режим. В кн.: Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. С. 25–75. <https://s.eruditor.one/file/904500/>
5. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2017. 640 с. ISBN 978-5-990823-6-4. <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB4/AA10F68F-28AB-431B-8082-24A9B6145ECF/>
6. *Минервин И. Г., Романюк В. А., Пицальник В. М., Трусков П. А., Покрашенко С. А.* Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85. № 3. С. 209–217. EDN: [TLOXRP](https://doi.org/10.7868/S0869587315010119). doi.org/10.7868/S0869587315010119
7. *Пицальник В. М., Минервин И. Г., Романюк В. А.* Особенности ледовых условий в Охотском море и Татарском проливе в зимний сезон 2014–2015 гг. // Физика геосфер: Девятый Всероссийский симпозиум: материалы докладов; Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 171–177. ISBN 978-5-8044-1545-8. EDN: [YOUHDN](https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-171-177)
8. *Романюк В. А.* Ледовый режим Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха: Дис. ... канд. географических наук: 25.00.28. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. 120 с. EDN: [HQTJIM](https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-120)
9. *Спичкин В. А.* Определение критерия крупной аномалии // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15–20.
10. *Шумилов И. В., Романюк В. А., Пицальник В. М.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. “Ice Data Processing”. 2023. № 2023682641 от 30.10.2023; опубли. 25.12.2023. <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>

11. Шумилов И. В., Ващенко Д. А., Романюк В. А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024662834. "NetCDF Processing". 2024. № 2024661302 от 20.05.2024; опубли. 30.05.2024. <https://fips.ru/EGD/a973c523-1bfb-46f1-a571-b2365ddc9085>
12. Pishchalnik V. M., Tambovsky V. S., Truskov P. A., Minervin I. G., Melkiy V. A., Romanyuk V. A., Galtsev A. A. Okhotsk Sea ice cover zoning // Proc. The 28th International Symposium on Okhotsk Sea and sea ice. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2013. P. 312–315. <https://istina.msu.ru/collections/4435697/>
13. World Meteorological Organization. WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva: WMO, 2014. 121 p. (WMO-No. 259, TP 145). [Updated 2017]. <https://library.wmo.int/idurl/4/41953>

Статья поступила в редакцию 14.07.2025, одобрена к печати 24.11.2025.

Для цитирования: Шумилов И. В., Пищальник В. М., Романюк В. А., Никулина И. В. Влияние циклонической деятельности на ледовый режим Охотского моря в осенне-зимний период // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 4. С. 98–114. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).6](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).6)

CYCLONIC ACTIVITY INFLUENCE ON THE ICE REGIME OF THE SEA OF OKHOTSK IN THE AUTUMN-WINTER PERIOD

I. V. Shumilov¹, V. M. Pishchalnik^{1,2}, V. A. Romanyuk², I. V. Nikulina¹

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences,
1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia,
e-mail: ilyaroleviki1@yandex.ru;

² Sakhalin State University,
33, Kommunisticheskyy Prospekt, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia,
e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

This paper presents the results of an analysis of the relationships between atmospheric circulation characteristics and ice cover in the Sea of Okhotsk, including the impact of cyclones, for the period from 2001 to 2020. The investigation is based on data from the ERA5 reanalysis produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), as well as on pentad ice concentration charts and surface weather analysis maps from the Japan Meteorological Agency (JMA). The analysis revealed that in >87 % of cases of cyclonic impacts on the Sea of Okhotsk, a decrease of ice area growth rate over 10 % is observed in at least one region of the sea (northwestern, northeastern, or southern), with >52 % of these cases occurring due to the central type of cyclonic impact and >35 % in the southern one. An assessment of the intensity of cyclone impacts on the ice cover during its autumn-winter development is provided, considering the typification of seasons according to the severity of ice conditions. Intraseasonal maximum values of ice extent slowdown during cyclonic passage were calculated. Relationships between the u-wind component and the standard deviation of surface pressure with the rate of ice extent change were identified for the whole Sea of Okhotsk and its individual regions. The largest deviations between the average values of atmospheric circulation parameters were identified with and without central or southern cyclonic influences on the sea area, specifically for the u- and v-wind components, wind speed, surface pressure and its standard deviation. Analysis of atmospheric circulation parameters and ice regime parameters allowed to quantify the contribution of various atmospheric processes to ice cover formation, facilitating the development of approaches to ice forecasting.

Keywords: Sea of Okhotsk, ice cover, atmospheric circulation, cyclones, cyclonic activity, statistical analysis, remote sensing

Acknowledgments: The study was carried out and financed within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002) and the state assignment of Sakhalin State University (FEFF-2024-0004) “Creation of scientific foundations for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholithosystems of coastal-marine wetlands and adjacent marine areas”.

References

1. Anderson, T., 1976: *Statisticheskii analiz vremennykh ryadov (Statistical analysis of time series)*. Moscow, Mir, 744 p., https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007734334/
2. Glebova, S. Yu., 2018: Tsiklony nad Tihim okeanom i dal'nevostochnymi moryami v holodnye i teplye sezony i ih vliyanie na vetrovoy i termicheskiy rezhim v posledniy dvadtsatiletniy period (Cyclones over the Pacific Ocean and Far Eastern seas in cold and warm seasons and their influence on the wind and thermal regime in the last twenty-year period). *Izvestiya TINRO*, **193**, 153–166, EDN: XWBMQH, <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
3. Dashko, N. A., 1979: Osobennosti zimnego rezhima vetrov na Okhotskom more (Features of the winter wind regime in the Sea of Okhotsk). *Trudy Gidromettsentra SSSR*, **216**, 110–119, https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009375012/
4. Dashko, N. A., 1998: Meteorologicheskii rezhim (Meteorological regime). *Proekt “Morya”. Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey. Vol. 9: Okhotskoe more. Vyp. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya (“Seas” project. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 9: Sea of Okhotsk. Iss. 1: Hydrometeorological conditions)*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 25–75, <https://s.eruditor.one/file/904500/>
5. Dumanskaya, I. O., 2017: *Ledovye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii (Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia)*. IG-SOCIN, Moscow; Obninsk, 640 p., ISBN 978-5-990823-6-4, <http://eliv.vniro.ru/lib/document/DB4/AA10F68F-28AB-431B-8082-24A9B6145ECF/>
6. Minervin, I. G., V. A. Romanyuk, V. M. Pishchalnik, P. A. Truskov, and S. A. Pokrashenko, 2015: Rayonirovanie ledyanogo pokrova Okhotskogo i Yaponskogo morey (Ice cover zoning of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan). *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, **85** (3), 209–217, EDN: TLOXRP, doi.org/10.7868/S0869587315010119
7. Pishchalnik, V. M., I. G. Minervin, and V. A. Romanyuk, 2015: Osobennosti ledovykh usloviy v Okhotskom more i Tatarskom prolive v zimniy sezon 2014–2015 gg. (Features of ice conditions in the Sea of Okhotsk and the Tatar Strait in the winter season of 2014–2015). *Proceedings of Fizika geosfer: Devyatyy Vserossiyskiy simpozium*. Vladivostok, Dalnauka, 171–177, ISBN 978-5-8044-1545-8, EDN: YUUDHN
8. Romanyuk, V. A., 2019: Ledovyy rezhim Okhotskogo morya v usloviyah global'noy tendentsii uvelicheniya temperatury vozduha (Ice regime of the Sea of Okhotsk under the conditions of a global trend of increasing air temperature). Cand. of Geographical Sciences diss., Vladivostok, POI FEB RAS, 125 p., EDN: HQZTIM
9. Spichkin, V. A., 1987: Opredelenie kriteriya krupnoy anomalii (Determination of the criterion of a major anomaly). *Trudy AANII*, **402**, 15–20.

10. Shumilov, I. V., V. A. Romanyuk, and V. M. Pishchalnik, 2023: Certificate of state registration No. 2023688937. Ice Data Processing. No. 2023682641, registered 30.10.2023; published 25.12.2023, <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>
11. Shumilov, I. V., D. A. Vashchenko, and V. A. Romanyuk, 2024: Certificate of state registration No. 2024662834. NetCDF Processing. No. 2024661302, registered 20.05.2024; published 30.05.2024, <https://fips.ru/EGD/a973c523-1bfb-46f1-a571-b2365ddc9085>
12. Pishchalnik, V. M., V. S. Tambovsky, P. A. Truskov, I. G. Minervin, V. A. Melkiy, V. A. Romanyuk, and A. A. Galtsev, 2013: Okhotsk Sea ice cover zoning. *Proceedings of The 28th International Symposium on Okhotsk Sea and sea ice*, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 312–315, <https://istina.msu.ru/collections/4435697/>
13. World Meteorological Organization, 2014: *WMO Sea-Ice Nomenclature*. Geneva, WMO, 121 p. (WMO-No. 259, TP 145). [Updated 2017], <https://library.wmo.int/idurl/4/41953>

Submitted 14.07.2025, accepted 24.11.2025.

For citation: Shumilov, I. V., V. M. Pishchalnik, V. A. Romanyuk, and I. V. Nikulina, 2025: Cyclonic activity influence on the ice regime of the Sea of Okhotsk in the autumn-winter period. *Journal of Oceanological Research*, **53** (4), 98–114, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).6](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).6)

秋冬季鄂霍次克海气旋活动对冰情的影响

I. V. Shumilov¹, V. M. Pishchalnik^{1,2}, V. A. Romanyuk², I. V. Nikulina¹

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of RAS,
1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 邮编: 693022,
电子邮件: ilyarolevik1@yandex.ru;

² Sakhalin State University,
33, Kommunisticheskii Prospekt, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 邮编: 693008,
电子邮件: vpishchalnik@rambler.ru

本研究分析了2001–2020年间大气环流特征与鄂霍次克海冰情(包括气旋影响)之间的相互关系。研究基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析数据、日本气象厅(JMA)的五日海冰密集度图及地面天气分析图。分析表明,在>87%的气旋影响鄂霍次克海水域的事件中,至少在其一个区域(西北部、东北部或南部)观测到海冰面积增长速率下降不低于10%,其中>52%的事件属于中心型气旋影响,>35%为南部型气旋影响。研究评估了气旋在秋冬季节海冰发展期间对冰盖的影响强度,并依据冰情严酷程度对季节进行了类型划分。计算了气旋过境期间导致冰情增长减缓的季内最大值。揭示了风场的u分量和地面气压均方差与鄂霍次克海整体及其各分区海冰面积变化速率之间的相互关系。明确了在受中心型或南部型气旋影响与不受影响条件下,大气环流指标平均值之间的最大差异,具体涉及风场的u和v分量、风速、地面气压及其均方差。通过对大气环流指标和冰情参数的分析,定量评估了不同大气过程对冰盖形成的贡献,这有助于开发冰情预报的新方法。

关键词: 鄂霍次克海·冰盖·大气环流·气旋·气旋活动·统计分析·遥感

致谢: 本研究在俄罗斯科学院远东分院海洋地质与地球物理研究所国家任务(FWWM-2024-0002)以及萨哈林国立大学国家任务“建立滨海湿地及邻近海域生物形态岩碳吸收与累积过程管理的科学基础”(FEFF-2024-0004)框架内执行并获得资助。