

Научная статья

УДК 551.467.3(265.53)

DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-348-364

EDN: SZTJYK



СИНОПТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНО ЛЕДОВИТЫХ И МАЛОЛЕДОВИТЫХ ЗИМ В ОХОТСКОМ МОРЕ

С.Ю. Глебова, Л.С. Муктепавел*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Проанализирована динамика ледовитости Охотского моря с середины 1970-х гг. и рассмотрены синоптические причины формирования ледовитых и малоледовитых периодов. Установлено, что экстремальное развитие ледовитости, отмечавшееся в 1977–1983 и 1998–2003 гг., было связано с комплексом общих синоптических условий в октябре–марте — активизацией зимних центров действия атмосферы (ЦДА), крайним восточным положением Алеутской депрессии, распространением гребня Сибирского антициклона в северные широты, обострением над Охотским морем градиентной зоны и ослаблением над ним циклонической деятельности. В результате на акваторию Охотского моря усиливалась адвекция холодного арктического воздуха, что способствовало интенсивному льдообразованию. Важной предпосылкой является ранняя (раньше третьей декады сентября) перестройка барического поля в предосенний период на зимний тип и образование в высоких широтах холодной области высокого давления. Для зим с умеренной ледовитостью характерным было нормальное состояние ЦДА, циклоны преимущественно выходили на западные районы Берингова моря, что способствовало выносу на акваторию Охотского моря не арктических, а умеренно-холодных беринговоморских воздушных масс. Развитие зимнего муссона начинается в климатические сроки (третья декада сентября). Периоды малоледовитых зим (1989–1997 гг. и 2004–2015 гг.) также объединяет ряд схожих синоптических условий — западное смещение Алеутской депрессии и снижение активности обоих ЦДА, ослабление муссонной циркуляции над Охотским морем, аномально высокая частота циклонов над бассейном, переносящих теплые воздушные массы. Формирование зимнего (северного) муссона происходит с запаздыванием на 1–2 декады (в октябре), и характеристикой барического поля в предосенний период является наличие области низкого давления в полярных широтах.

Ключевые слова: ледовитость Охотского моря, центры действия атмосферы, барическое поле, муссонная циркуляция, циклоны, перестройка атмосферного режима

Для цитирования: Глебова С.Ю., Муктепавел Л.С. Синоптические предпосылки и сценарии развития экстремально ледовитых и малоледовитых зим в Охотском море // Изв. ТИНРО. — 2026. — Т. 206, вып. 2. — С. 348–364. DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-348-364. EDN: SZTJYK.

* Глебова Светлана Юрьевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, svetlana.glebova@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-5736-5758; Муктепавел Лариса Станиславовна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, larisa.muktepavel@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0001-6938-5581.

© Глебова С.Ю., Муктепавел Л.С., 2026

Original article

Synoptic prerequisites and scenarios for forming the extreme ice-rich and low-ice winters in the Okhotsk Sea

Svetlana Yu. Glebova*, Larisa S. Muktepavel**

*, ** Pacific Branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* Ph.D., leading researcher, svetlana.glebova@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-5736-5758

** Ph.D., leading researcher, larisa.muktepavel@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0001-6938-5581

Abstract. The ice cover dynamics in the Okhotsk Sea since 1970s is analyzed and synoptic atmospheric conditions for ice-rich and low-ice periods are determined. These periods were distinguished by combination of certain synoptic patterns from October to March. The extremely vast ice cover was observed in 1977–1983 and 1998–2003 when the winter centers of atmospheric action were active, the Aleutian Low located in the extreme eastern position, the ridge of Siberian High extended far north, the air pressure gradient over the Okhotsk Sea was high, and cyclonic activity over the sea was weak. As the result, cold Arctic air invaded to the Okhotsk Sea and contributed to rapid forming the sea ice. Typical prerequisite of this process was a vast cold zone of high pressure at high latitudes promoted early transition of the barometric pressure field to winter patterns in early September. In the winters with moderate ice cover, the atmospheric centers were less active and the tracks of cyclones were directed mainly to the western Bering Sea that provided transfer of rather warm air masses from Bering Sea to the Okhotsk Sea. Under these conditions, winter monsoon began in late September. The periods of low-ice winters in 1989–1997 and 2004–2015 were distinguished by low activity of the Siberian High and Aleutian Low with westward shift of the latter and abnormally high frequency of cyclones passed over the Okhotsk Sea and induced warm air advection. In this case the winter monsoon formed in 10–20 days later, in October. Such conditions were proceeded by lowered atmospheric pressure in the polar zone.

Keywords: ice cover, Okhotsk Sea, atmospheric action center, atmospheric pressure, monsoon circulation, cyclone, atmosphere regime

For citation: Glebova S.Yu., Muktepavel L.S. Synoptic prerequisites and scenarios for forming the extreme ice rich and low ice winters in the Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2026, vol. 206, no. 2, pp. 348–364. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-348-364. EDN: SZTJYK.

Введение

Ледовые условия формируются вследствие сложных механизмов взаимодействия атмосферы и океана и оказывают существенное влияние на формирование климата, термического режима вод, структуру морских течений и другие процессы. Знание причинно-следственных связей изменчивости ледовой обстановки и атмосферной циркуляции позволяет выделять оптимальные районы и сроки для зимнего промысла, определять условия нереста промысловых видов рыб, оценивать временные рамки биологических событий (например, пик цветения фитопланктона).

Ход ледовитости в Охотском море за весь существующий период наблюдений делится на относительно малоледовитые и ледовитые периоды (рис. 1). Для периода 1958–1983 гг. характерным было нестабильное накопление положительных аномалий площади ледяного покрова, но начиная с 1984 г. отмечается преобладание мягких и экстремально мягких зим, что может свидетельствовать о глобальных климатических изменениях в атмосфере и гидросфере. Критерием для выбора аномальных сезонов в Охотском море были аномально низкие площади ледяного покрова в период максимального развития льда (февраль-март) в Охотском море. Аномальность ледовитости определялась соотношениями: $L_m - L_{cp} > 1/2A$ — для аномально ледовитых зим, $L_m - L_{cp} < 1/2A$ — для аномально малоледовитых зим, где L_m — среднемесячная ледовитость в феврале, L_{cp} — среднемноголетнее значение ледовитости в феврале, A — амплитуда изменения характеристики [Муктепавел, 2007].

На графике рис. 1 видно, что в межгодовой изменчивости ледовитости моря наблюдается определенная цикличность, а именно наличие разных по продолжитель-

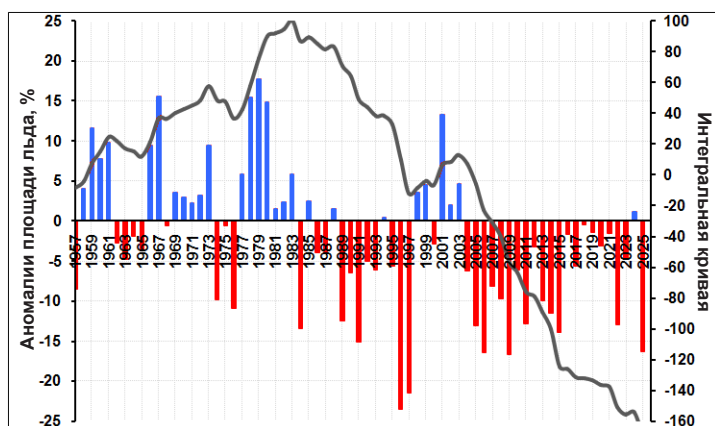


Рис. 1. Интегральная кривая среднегодовой площади ледяного покрова в Охотском море на фоне ее аномалий за период 1957–2025 гг.

Fig. 1. Annual mean anomalies of the ice cover in Okhotsk Sea in 1957–2025 and cumulative curve of the ice cover since 1957

ности периодов аномального увеличения и уменьшения площади льда. Так, в периоды преобладания суровых зим (1950–1970-е гг.) фиксируются годы с пониженной ледовитостью (1962–1965 и 1974–1976), а на фоне преобладания отрицательных аномалий после 1984 г. (в 1998–2003 гг.) количество льда в Охотском море вновь превысило «норму», достигнув экстремальных значений в 2001 г. При этом выделяется период с 2016 по 2025 г., для которого характерно чередование малоледовитых и умеренно ледовитых ледовых сезонов [Муктепавел, 2020]. С 2004 г. сохраняется режим формирования малоледовитых и умеренно ледовитых зим (за исключением 2024 г., когда в феврале и марте события развивались по сценарию аномально ледовитых зим). Начало последнего периода уменьшения площади морского льда совпадает со сменой тенденций в характеристиках центров действия атмосферы (ЦДА) над Азиатско-Тихоокеанским регионом и однонаправленных многолетних трендов изменений температуры воды и воздуха в отдельных районах Дальнего Востока [Глебова и др., 2009; Пищальник и др., 2016; Шатилина и др., 2016; и др.].

В исследованиях ледовитости Охотского моря накоплен значительный научный материал. В.В. Плотников [2002] провел комплексное исследование изменчивости ледовых условий Охотского моря и определяющих их факторов за период 1957–1999 гг., уделив особое внимание сезонной динамике ледовитости. А.М. Полякова [2012] изучила сверхдолгосрочные связи между суммарной продолжительностью действия различных типов атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана и площадью ледяного покрова Охотского моря с учетом траекторий перемещения циклонов и положения антициклонов. Ряд исследований [Глебова, 2012; Хен и др., 2012; Мезенцева, Федулова, 2017] посвящен анализу многолетних изменений ключевых параметров дальневосточных морей за 1980–2012 гг.; выявлены характерные особенности температуры воздуха и воды, ледовитости дальневосточных морей. Механизмы формирования аномальной ледовитости на всей акватории Охотского моря рассмотрены в работах Т.А. Шатиловой и Г.И. Анжиной [2008], а также Л.С. Муктепавел и Т.А. Шатиловой [2009]. Исследователи оценили закономерности возникновения экстремально малоледовитых зим с учетом макропроцессов в средней тропосфере над вторым естественным синоптическим районом Северного полушария (30–70° с.ш. 80–160° в.д.). На основе выявленных взаимосвязей между площадью ледяного покрова Охотского моря и гидрометеорологическими параметрами осенне-зимнего сезона (температурой воды и воздуха, интенсивностью циклонической деятельности) И.В. Шумилов с соавторами [2024] разработали физико-статистический метод долгосрочного прогноза ледовитости с заблаговременностью до 4 мес. Также было установлено [Шумилов и др., 2025], что выход циклонов на акваторию Охотского моря может замедлять рост площади ледяного покрова не менее чем на 10 %.

С прогрессом спутниковых технологий работы по выявлению взаимозависимостей между характеристиками атмосферы и льда приобретают особую важность для развития методов прогнозов. Ключевыми задачами остаются выявления критических состояний ледовитости моря и механизмов их формирования. Несомненно, что многолетние колебания ледовитости Охотского моря происходят вследствие трансформации синоптического режима над Дальневосточным регионом, включая изменения состояния сезонных ЦДА, смещение траекторий циклонов, перестройку преобладающих воздушных потоков и т.д.

Таким образом, настоящая статья посвящена анализу особенностей атмосферных процессов регионального и локального масштаба, формирующихся в малоледовитые и ледовитые периоды в Охотском море.

Материалы и методы

Для анализа ледовитости Охотского моря в качестве исходной информации использовались электронный архив карт ледовых условий и база декадной площади льда в Охотском море (с 1979 г.), хранящиеся в лаборатории промысловой океанографии ТИНРО. Данные получены преимущественно по материалам наиболее информативных регулярных космических съемок полярно-орбитальных российских (серии Метеор–М) и американских (серии NOAA (AQUA (Modis))) спутников с пространственным разрешением от 60 до 500 м. Декодированные изображения спутников поступают в ТИНРО по каналам электронной почты из Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» г. Хабаровск (в рамках договора). Сведения об использовании ледовой информации с 1957 г. подробно изложены в работе Л.С. Муктепавел [2007], все исследования базировались на декадных данных по ледовитости.

Результаты съемок ледяного покрова Охотского моря также доступны на официальном сайте Japan Meteorological Agency (JMA) (<http://www.data.jma.go.jp>). Данные предоставлены в виде цветокодированных по стандартным грациям сплоченности льда карт-схем. JMA является частью системы Всемирной сети метеорологических спутниковых наблюдений и постоянно совершенствует свою систему мониторинга за морским льдом. Дополнительно были использованы спутниковые ледовые карты National Ice Center, США (http://www.natice.noaa.gov/pub/West_Arctic/) с 1998 г.

Данные организованы в виде баз данных ГИС, которые предоставляют возможность с помощью ArcView или ARC/INFO в наглядной и удобной форме отображать, исследовать, запрашивать и анализировать ледовую информацию с 1997. В каталоге \arc хранятся данные в формате обменного файла ARC/INFO (.e00). Каталог \OKHOTSK содержит информацию по соответствующему году. Покрытия ArcView хранятся в географической проекции в десятичных градусах. Для каждой декады отдельного года с декабря по май строились карты пространственного распределения льда. Критерием для выбора экстремальных сезонов в Охотском море были площади ледяного покрова в период максимального развития льда (февраль-март) в Охотском море (методика представлена в работе Л.С. Муктепавел [2007]).

Для анализа многолетнего хода аномалий ледовитости использовался метод интегральных кривых, которые представляют собой накопленные суммы среднесезонных аномалий. Фактически интегральная кривая аномалий — это сглаженная кривая многолетнего хода параметра [Гирс, Кондратович, 1978]. Одновременно она позволяет определить наличие и продолжительность коротких и длинных циклов во временном ходе параметра.

Исследование характера влияния атмосферных процессов на условия формирования ледовитости в Охотском море фокусировалось на анализе синоптических показателей регионального и локального масштаба, осредненных для осенне-зимнего сезона (октябрь-март), который включает в себя не только месяцы становления и развития льда (январь-март), но и предшествующий сезон начала выхолаживания моря (октябрь-декабрь).

В качестве первичного исходного материала были привлечены синоптические карты, осредненные за 10-дневный период, за временной интервал 1974–2025 гг. (общее количество 936 карт). Для 1974–1989 гг. карты декадного осреднения были позаимствованы из ежемесячных Синоптических бюллетеней, выпускавшихся Центральным институтом погоды (ЦИП). С 1990 г. для построения карт 10-дневных полей приземного давления привлекались ежедневные факсимильные синоптические карты Японского метеорологического агентства (методика формирования и обработки карт подробно изложена в работе С.Ю. Глебовой с соавторами [2009]). На основе этих карт для каждой декады месяца определены:

- пространственное положение и интенсивность Сибирского антициклона и Алеутской депрессии;

- меридиональный индекс атмосферной циркуляции А.Л. Каца (I_m) как показатель интенсивности и направленности локального муссонного переноса воздушных масс над акваторией Охотского моря, расчет индекса выполнен в соответствии с алгоритмом, описанным в публикации С.Ю. Глебовой [2006];

- сроки перехода летнего муссона на зимний в Охотском море (декада смены положительного знака I_m на отрицательный).

Для обеспечения согласованности временных рядов и исключения межгодовой изменчивости все данные (включая ряд ледовитости) были приведены к единому периоду наблюдений (с 1974 по 2025 г.) и сглажены осреднением по 5-летним периодам.

Дополнительно составлялись сборно-кинематические карты траекторий приземных циклонов для каждого месяца осенне-зимнего сезона за 1995–2025 гг. (180 карт), которые использовались также для определения интенсивности циклонов в индексах циклоничности [Куницын, 1956] (методика представлена в работе С.Ю. Глебовой [2018]).

Результаты и их обсуждение

Известно, что в межгодовой изменчивости ледовитости Охотского моря присутствует определенная цикличность, а именно наличие разных по продолжительности периодов аномального увеличения и уменьшения площади льда [Муктепавел, Шатилина, 2009; Пищальник и др., 2016; Муктепавел, 2020; Анжина, Вражкин, 2021; и др.]. Согласно осредненному графику с середины 1970-х гг. наблюдается долговременное уменьшение площади ледяного покрова (рис. 2, а). Тем не менее в рамках нисходящего полувекового тренда ледовитость трижды увеличивалась: на рубеже 1970/1980, 1990/2000 и 2010/2020 гг., практически через каждые 20 лет; при этом во время последнего холодного периода (2016–2021) уровень ледовитости лишь приближался к нормальному.

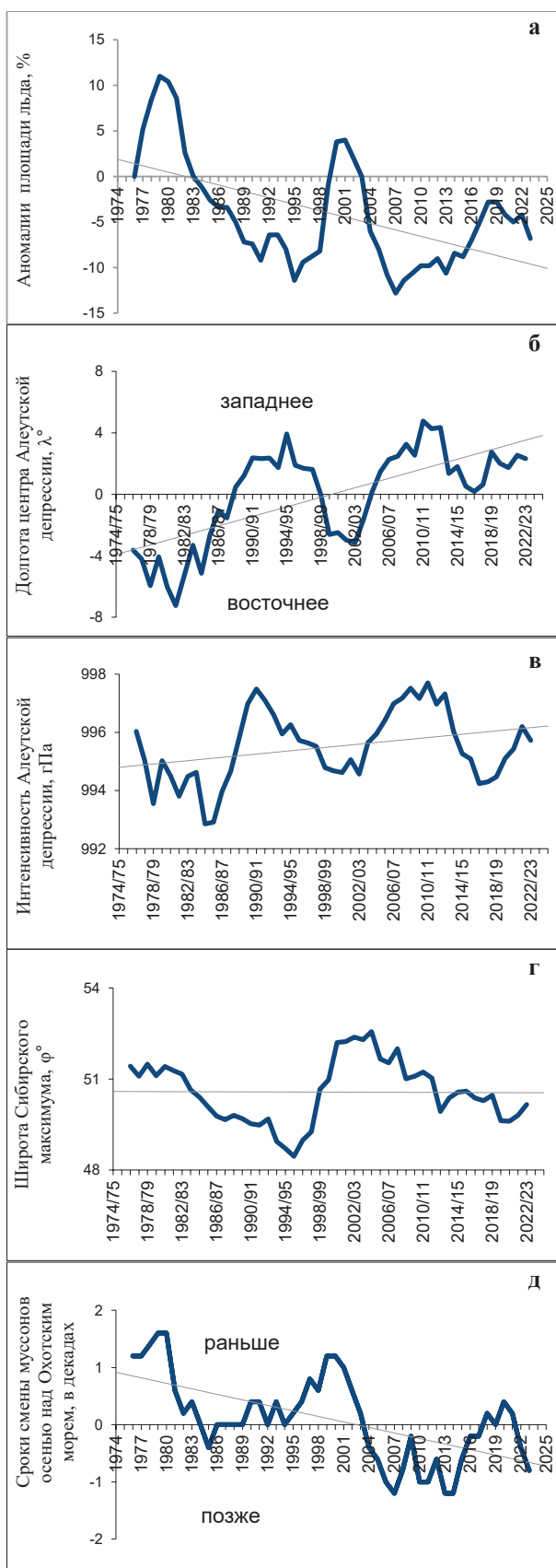
Проведенный сравнительный анализ данных показал, что характер ледовитости в Охотском море в большой степени определяется состоянием Алеутской депрессии в октябре-марте. На протяжении рассматриваемого периода процесс сокращения льда происходил одновременно с неуклонным смещением депрессии с востока на запад, а сама она медленно теряла интенсивность (давление в ее области имело слабую положительную тенденцию) (рис. 2, а–в). Вместе с тем в конце 1970-х, начале 1980х, начале 2000-х гг. отмечалось отклонение показателей от «доминирующих линий», когда депрессия возвращалась на восток и становилась наиболее активной. Именно в эти годы ледовитость в Охотском море возрастала до экстремальных величин.

Помимо Алеутской депрессии, в формировании ледовых условий Охотского моря важную роль играет и Сибирский максимум: в течение обоих периодов аномального развития льда антициклон осенью и зимой занимал наиболее северное положение (рис. 2, г). Примечательно, что в конце 2010-х гг. интенсивность депрессии вновь возросла, хотя ее отклонение на восток было менее масштабным по сравнению с предыдущими холодными периодами, при этом Сибирский антициклон располагался не на севере, а был максимально смещен к югу. В эти годы ледовитость хотя и увеличивалась, но не превышала среднезимнюю норму.

Рис. 2. Многолетний ход ледовитости Охотского моря (а) и атмосферных показателей в октябре-марте: долготы (б) и интенсивности (в) Алеутской депрессии, широты Сибирского антициклона (г), смещение декад смены «локальных» муссонов над Охотским морем осенью относительно третьей декады сентября (д)

Fig. 2. Interannual variations of the Okhotsk Sea ice cover (a); longitudinal position (б) and intensity (в) of the Aleutian Low and latitude of the Siberian High center (г) in October-March; temporal shifts (by 10-days) of the monsoon change over Okhotsk Sea in autumn relative to climatic mean timing in late September (д)

Как правило, Сибирский максимум определяет суровость зим в Охотском море через изменение интенсивности выноса холодных воздушных масс с континента; Алеутская депрессия влияет на поступление воздушных потоков с океана. При взаимодействии этих ЦДА над Охотским морем формируется градиентная зона и развивается муссонная циркуляция, которая напрямую влияет на ветровую обстановку на бассейне и, как следствие, на его термический режим. Интенсивное развитие этих барических систем начинается в сентябре-октябре и сопровождается сменой атмосферных режимов над Охотским морем (переходом от южной ветровой циркуляции к северной). Анализ многолетнего хода декадных значений меридионального индекса (Im) показал, что в среднемноголетнем плане датой начала развития локального северного переноса над Охотским морем является третья декада сентября, причем отклонение в обе стороны может достигать 2–3 декад (в экстремальных случаях от первой декады сентября до третьей декады



октября). Оказалось, что сроки перехода к зимнему муссону тесно связаны с последующей ледовитостью: раннее его формирование предшествует более интенсивному льдообразованию, причем чем раньше происходит смена процессов, тем выше значения ледовитости (рис. 2, а, д). Напротив, задержка муссона становится предпосылкой для малоледовитых зим.

Смену муссонов определяют сроки становления сезонных ЦДА. «Преждевременная» активизация Сибирского антициклона и Алеутской депрессии запускает всю цепочку событий: раньше образуется зона барических градиентов с преобладающими над Охотским морем северными ветрами и возникает адвекция холода, морская поверхность охлаждается быстрее, и процесс льдообразования проходит ускоренными темпами. При позднем образовании центров действия, соответственно, сроки формирования ледяного покрова задерживаются. Фактически состояние этих барических систем в начале осени закладывает основу для развития атмосферных процессов в последующие зимы по холодному или теплomu типу, определяя тем самым и дальнейшую эволюцию ледяного покрова.

Для выявления различий в характере атмосферной циркуляции над Охотским морем для периодов высокой и низкой ледовитости строились карты среднего барического поля и их аномалий за октябрь–март. С 1995 г. дополнительно использовались данные о повторяемости и интенсивности (в индексах циклоничности) приземных циклонов над регионом.

В течение первого из рассматриваемых периодов холодных зим (1977–1983 гг.), характеризовавшегося стабильно положительными аномалиями ледового покрова, Алеутская депрессия находилась юго-восточнее своего климатического положения, в районе зал. Аляска, и была очень глубокой (отрицательные аномалии давления охватывали северную часть Тихого океана) (рис. 3). Мощность Сибирского антициклона также значительно превышала норму, и самые большие положительные аномалии отмечались в полярной области, что может свидетельствовать о формировании здесь области холода (рис. 3, б). Зона барических градиентов между атмосферными центрами

имела высокую степень перепадов давления и была меридионально ориентированной, поступающий вдоль нее холодный арктический воздух способствовал быстрому выхолаживанию водной поверхности и ускоренному процессу льдообразования. При такой синоптической ситуации складывались условия для развития тяжелой ледовой обстановки.

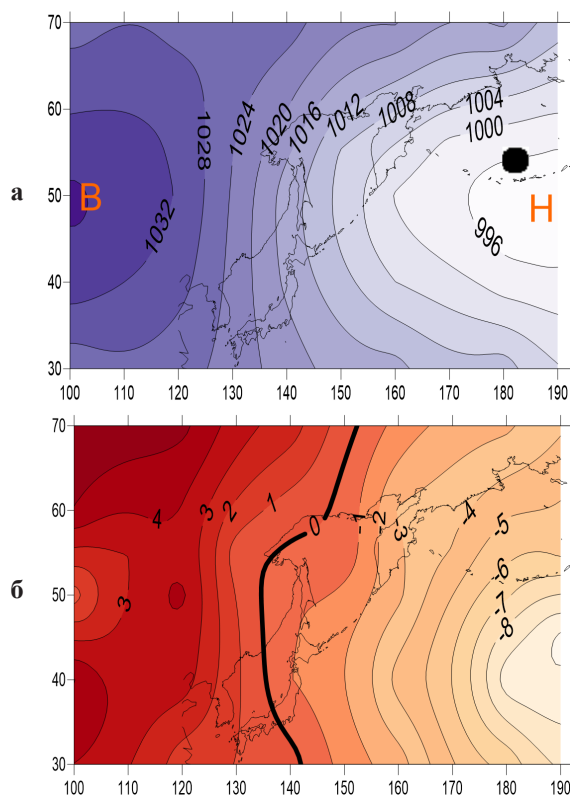


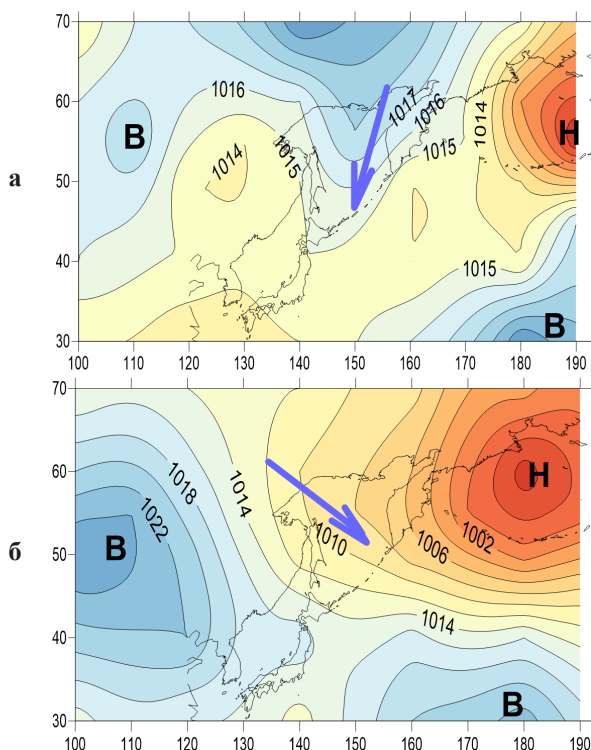
Рис. 3. Средние поля приземного давления (а) и его аномалий (б) в октябре–марте для экстремально ледовитого периода 1977–1983 гг.; здесь и далее: *черный круг* — среднемноголетнее положение Алеутской депрессии в октябре–марте; *В* и *Н* — соответственно антициклон и циклон

Fig. 3. Average atmospheric pressure at the sea surface (a) and its anomalies (b) in October–March for the ice-rich period of 1977–1983; Hereinafter: *black circle* — mean position of Aleutian Low center in October–March; *B* — anticyclones; *H* — cyclones

Самым ледовитым годом этого периода можно назвать 1979 г., когда аномалия площади ледяного покрова за зиму превышала 15 %-ный уровень (см. рис. 1). Для оценки характера муссонной циркуляции (времени смены муссонов) в предшествующий осенний период были построены карты среднего барического поля для второй и третьей декад сентября 1978 г. (третья декада — нормальные сроки развития зимнего муссона, вторая декада — опережение срока на одну декаду) (рис. 4).

Рис. 4. Синоптические ситуации в сентябре 1978 г. перед экстремально ледовитой зимой 1979 г.: **а** — раньше срока (вторая декада сентября); **б** — средние сроки (третья декада сентября); здесь и далее: синими стрелками показано основное направление ветрового переноса

Fig. 4. Synoptic situations in September 1978, prior to the ice-rich winter of 1979: **a** — in middle September (before usual timing); **б** — in late September (in usual timing). Hereinafter: blue arrows — main wind transfer



Во второй декаде сентября процесс перехода от летнего барического режима к зимнему уже начался. Над прибрежными районами пока сохранялась летняя дальневосточная ложбина, но на востоке Берингова моря образовалась глубокая Алеутская депрессия, а над материком малоактивный Сибирский антициклон находился в гребне обширного Полярного антициклона (рис. 4, а). По южной периферии полярного гребня, вытянутого в сторону Охотского моря, в бассейн проникали холодные воздушные массы с Чукотки, ветровой перенос имел северную направленность. В третьей декаде типичная для зимы ситуация сложилась окончательно: оба ЦДА заняли свои обычные для зимнего сезона положения, над Охотским морем сформировался устойчивый северо-западный перенос (рис. 4, б).

Следующий период высокой ледовитости (1998–2003 гг.) отличался менее экстремальными ледовыми показателями (кроме 2001 г.) и нестабильностью (в череде лет с положительными аномалиями наблюдался малоледовитый 2000 г.). Синоптическая картина осенне-зимнего сезона также имела некоторые особенности. Сибирский антициклон в своей центральной области был ослаблен: над материком преобладали отрицательные и слабopоложительные аномалии давления, однако повышенный фон давления на севере региона может свидетельствовать о значительном усилении в те годы его северного отрога (рис. 5).

Алеутская депрессия располагалась над восточными районами Берингова моря (возле Бристольского залива), ее активность превышала норму. В область депрессии поступали преимущественно материковые полярно-фронтовые циклоны, которые огибали Охотское море с юга и наибольшей интенсивности достигали над восточными

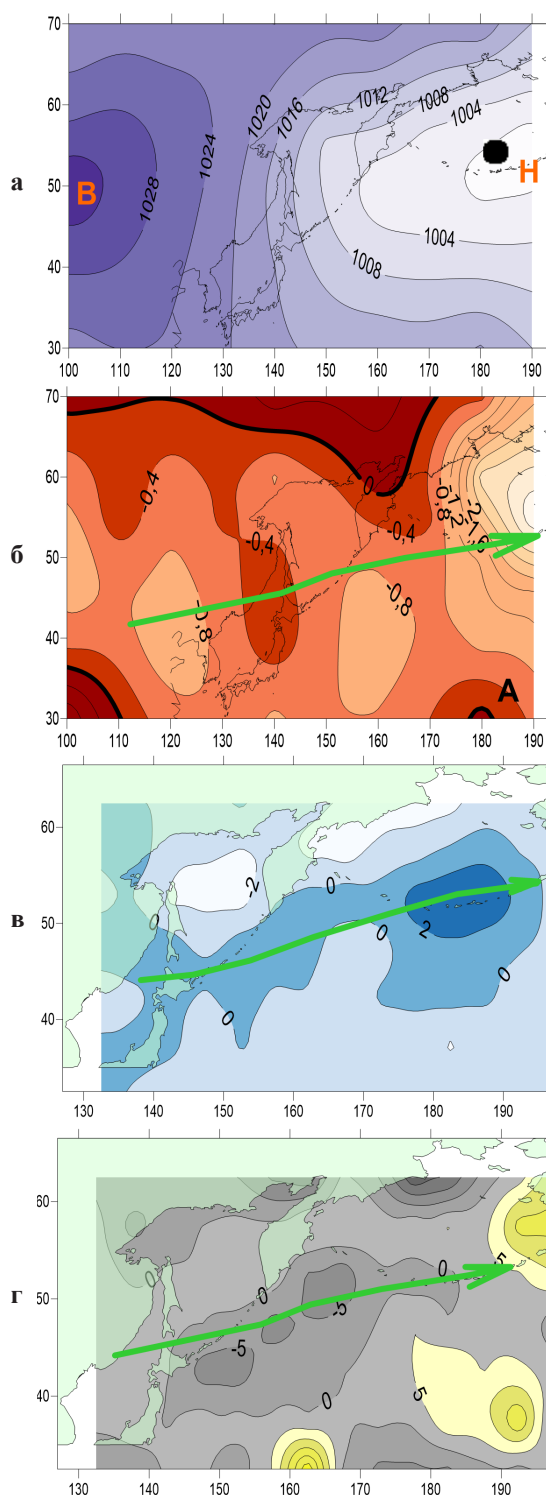


Рис. 5. Средние поля приземного давления (а), его аномалий (б), аномалий количества (в) и интенсивности (г) циклонов в октябре-марте для экстремально ледовитого периода 1998–2003 гг.; здесь и далее: *зеленые стрелки* — траектории циклонов за сезон

Fig. 5. Average atmospheric pressure at the sea surface (а) and its anomalies (б) in October-March and anomalies of number (в) and intensity (г) of cyclones over the Okhotsk Sea in the same season for the ice-rich period of 1998–2003. Hereinafter: *green arrows* — cyclone tracks

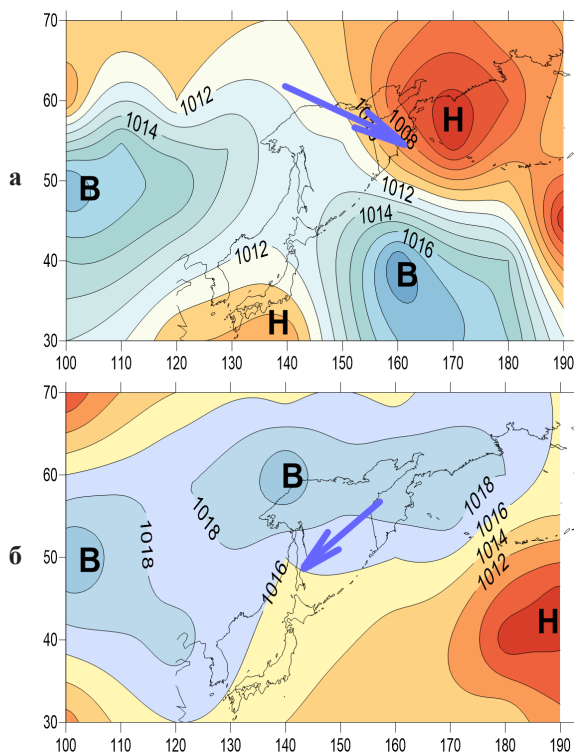
районами берингоморского бассейна. Как правило, в таких случаях Охотское море оказывается под влиянием их глубоких тыловых ложбин, которые способствуют усилению над морем северных ветровых переносов и выхолаживанию поверхности моря. Можно отметить некоторый отличительный нюанс. В предшествующий холодный период (1977–1983 гг.) зона сгущения изобар охватывала все Охотское море. В 1998–2003 гг. адвекция холода была более локальной, менее контрастной и располагалась

преимущественно вблизи северо-восточных районов моря, что могло сказываться на некотором снижении скорости выхолаживания бассейна и нарастания ледяного покрова.

По аналогии с предыдущим периодом для определения особенностей начала развития зимней муссонной циркуляции перед экстремально ледовитым 2001 г. составлялись карты осредненной синоптической ситуации для второй и третьей декад сентября 2000 г. (рис. 6). Присутствие зимних ЦДА обозначилось уже во второй декаде. Сибирский антициклон был хорошо развит, а его гребень ориентирован в сторону Охотского моря. Алеутская депрессия имела два центра, один из которых располагался на западе Берингова моря и вызывал над охотоморским бассейном северо-западный перенос (рис. 6, а). В третьей декаде сентября перестроочный процесс усилился. Мощности антициклона возросла, а его северо-восточный гребень расширился до Чукотки, усиливая адвекцию холода на акваторию Охотского моря. В его области над северо-охотоморским побережьем образовалось самостоятельное ядро высокого давления, являвшееся дополнительным центром холода.

Рис. 6. Синоптические ситуации в сентябре в 2000 г. перед экстремально ледовитой зимой 2001 г.: **а** — раньше срока (вторая декада сентября); **б** — средние сроки (третья декада сентября)

Fig. 6. Synoptic situations in September 2000, prior to the ice-rich winter of 2001: **a** — in middle September (before usual timing); **б** — in late September (in usual timing)



Последний период увеличения льда в Охотском море пришелся на 2016–2021 гг., когда после цикла малоледовитых зим уровень ледовитости максимально приблизился к нормальному. В эти годы положение депрессии соответствовало среднемуголетнему, распределение давления в ее области также было в пределах климатической нормы (рис. 7, а, б). В целом ослабленным был и Сибирский антициклон (в районах распространения его северных гребней над полярной зоной наблюдались сплошные отрицательные аномалии давления), а центр антициклона оказался смещенным к западу (рис. 7, а, б).

Еще одной отличительной особенностью периода была активная циклоническая деятельность на субтропическом фронте: южные циклоны приходили на западные районы Берингова моря и здесь же углублялись (рис. 7, в, г). Из-за ослабления сибирского гребня вынос арктических воздушных масс на акваторию Охотского моря был ограниченным, в большей степени в тылу берингоморских циклонов сюда поступал умеренный морской воздух Берингова моря. Как следствие, в Охотском море отсутствовали условия для экстремального развития ледовитости.

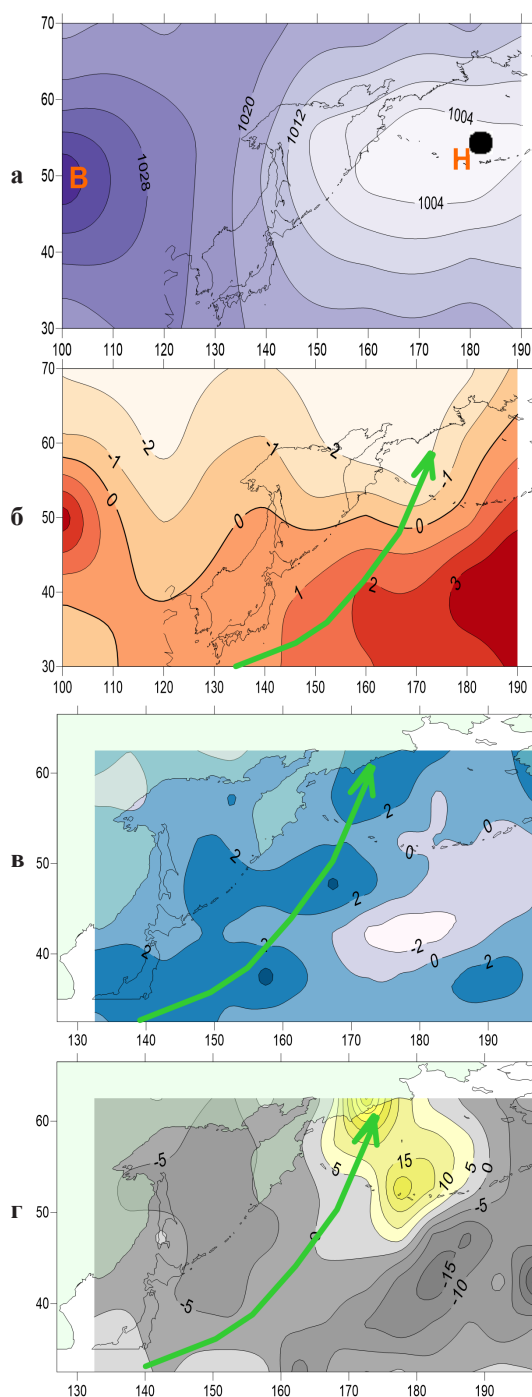


Рис. 7. Средние поля приземного давления (а), его аномалий (б), аномалий количества (в) и интенсивности (г) циклонов в октябре-марте в период нормальной ледовитости 2016–2021 гг.

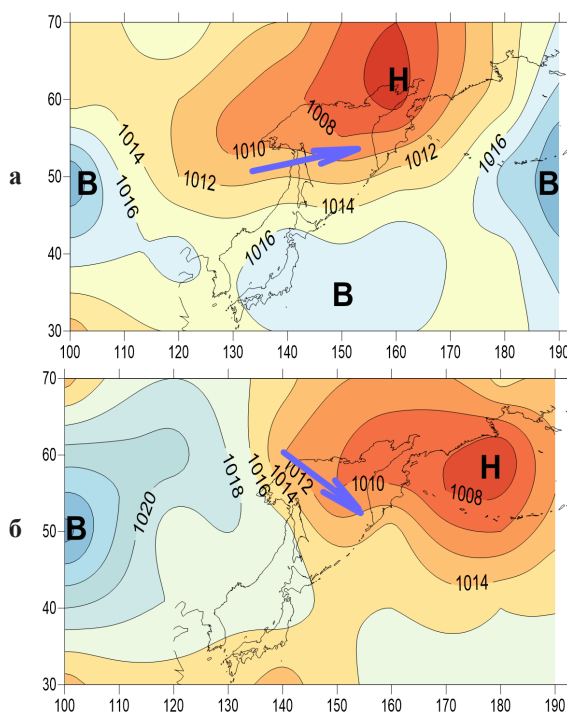
Fig. 7. Average atmospheric pressure at the sea surface (a) and its anomalies (б) in October-March and anomalies of number (в) and intensity (г) of cyclones over the Okhotsk Sea in the same season for the period of 2016–2021 with moderate ice cover

Начало перестройки барического поля в предосенний период проанализировано на примере 2018 г., предшествующего среднеледовитому 2019 г. цикла (см. рис. 1). Синоптические процессы второй декады сентября отличались зональным распределением барических систем: северные широты были заняты областью низкого давления с самостоятельным центром (арктической депрессией) над Чукоткой, южнее располагался пояс высокого давления с зарождающимся над материком Сибирским антициклоном. При подобной барической конфигурации над Охотским морем образовалась широтно-ориентированная градиентная зона, в которой преобладали западные и юго-западные воздушные переносы, признаки локального зимнего муссона еще отсутствовали.

Окончательное формирование зимнего барического поля произошло в третьей декаде месяца — в средние сроки (рис. 8). Следовательно, зиме с умеренной ледовитостью предшествовали атмосферные события, развивающиеся по типичному (нормальному) сценарию.

Рис. 8. Синоптические ситуации в сентябре в 2018 г. перед среднеледовой зимой 2019 г.: **а** — раньше срока (вторая декада сентября); **б** — средние сроки (третья декада сентября)

Fig. 8. Synoptic situations in September 2018, prior to the winter of 2019 with moderate ice cover: **a** — in middle September (before usual timing); **б** — in late September (in usual timing)



Синоптические ситуации, приведшие к аномально низкой ледовитости в Охотском море в периоды 1989–1997 и 2004–2015 гг., были очень схожи по характеру атмосферной циркуляции. Алеутская депрессия располагалась юго-западнее климатического положения; интенсивность обоих центров действия была низкой, что следует из распределения зон отрицательных и положительных аномалий в области депрессии и антициклона (рис. 9, а–г). Как следствие, уменьшались барические градиенты, ослабевал зимний муссон. Кроме того, непосредственно над Охотским морем отмечался интенсивный циклогенез, причем в первый период (1989–1997 гг.) на бассейн выходили преимущественно материковые полярно-фронтовые циклоны, а во втором периоде (2004–2015 гг.) — субтропические циклоны. Наибольшей активности они достигали, как правило, севернее или южнее акватории, стимулируя адвекцию тепла на разные участки Охотского моря (рис. 9, д–з). В результате комбинации этих факторов (смещении депрессии в западном направлении, ослаблении обоих ЦДА, активизации циклоничности) в Охотском море создавались условия для аномально теплых зим.

Для определения сроков перехода барического поля на зимний тип в каждом периоде были выбраны годы с наибольшими отрицательными аномалиями площади льда — 1996 и 2006. Поскольку теплым зимам, как правило, предшествует задержка зимнего муссона (см. рис. 2), анализ предосенней синоптической ситуации проводился для первой и второй декад октября предшествующих лет — соответственно 1995 и 2005. И в этом случае наблюдается аналогичность синоптических картин, особенно в первых декадах октября. Сибирский антициклон уже сформировался, но имел не северный, а южный гребень, направленный в сторону Северотихоокеанского антициклона. Над северными широтами располагался пояс низкого давления, объединяющий три циклонических центра, и один из них находился непосредственно над Охотским морем (рис. 10, а, б). При подобной ситуации зимний муссон над

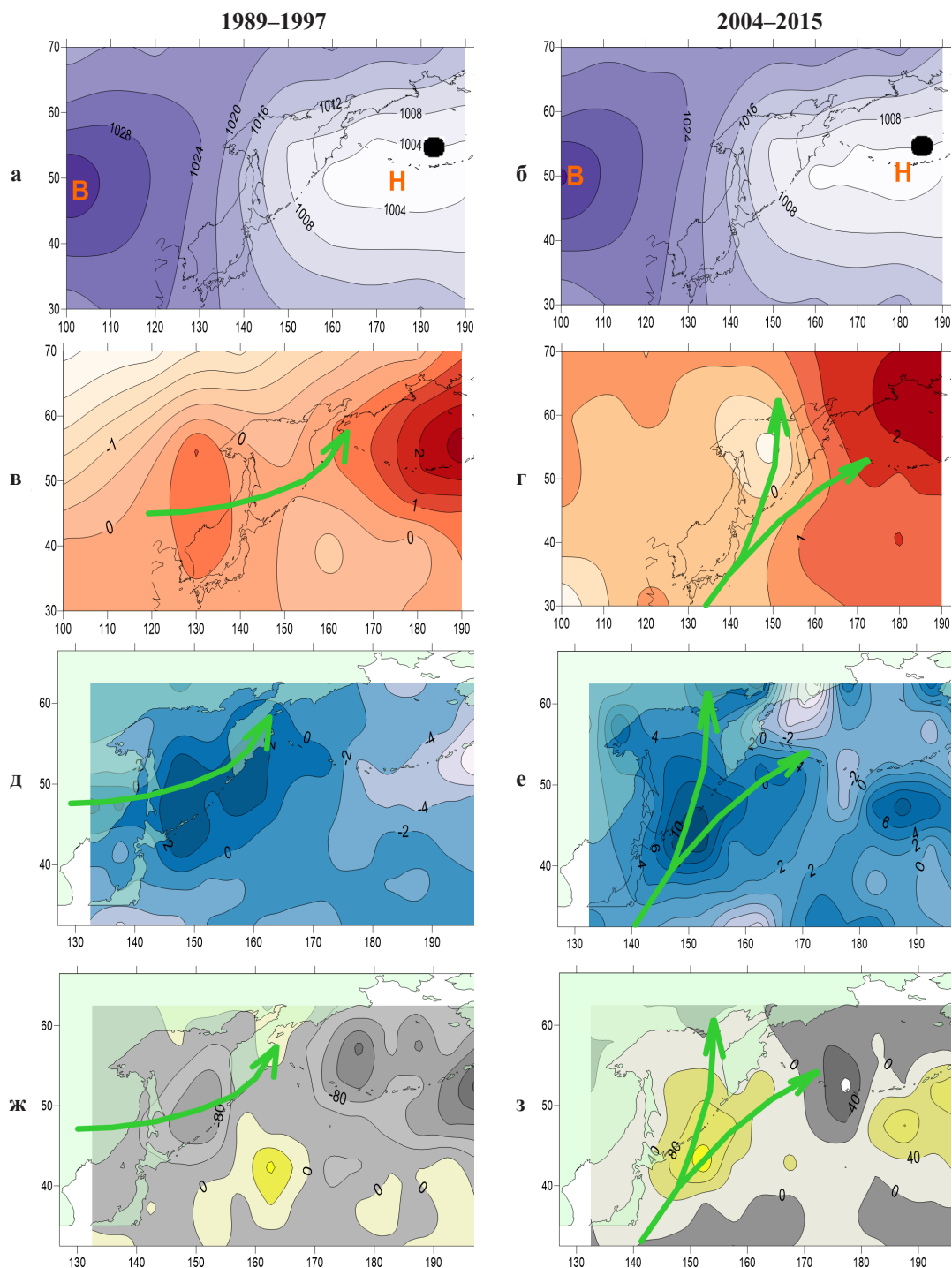


Рис. 9. Средние поля приземного давления (а, б), его аномалий (в, г), аномалий количества (д, е) и интенсивности (ж, з) циклонов в октябре-марте для периодов аномально низкой ледовитости 1989–1997 и 2004–2015 гг.

Fig. 9. Average atmospheric pressure at the sea surface (а, б) and its anomalies (в, г) in October-March and anomalies of number (д, е) and intensity (ж, з) of cyclones over the Okhotsk Sea in the same season for the low-ice periods of 1989–1997 and 2004–2015

ооомоморским бассейном отсутствует, а преобладают разнонаправленные ветры, в том числе южных четвертей.

Во второй декаде 1995 г. картина практически не изменилась, лишь обширнее стал Сибирский антициклон, а над Охотским морем из-за стационарирующего циклонического вихря сохранялся неустойчивый ветровой режим (рис. 10, в). Во второй декаде 2005 г. область низкого давления была оттеснена к северу Северотихоокеанским антициклоном. Над Охотским морем в сформированной зоне градиентов образовался слабый гребень, благодаря которому над бассейном преобладал юго-западный перенос, не характерный для середины октября (рис. 10, г). Фактически подобные синоптические условия предосеннего сезона создавали препятствия для формирования устойчивого зимнего муссона в нормальные сроки, что приводило к существенному запаздыванию перестроечного процесса.

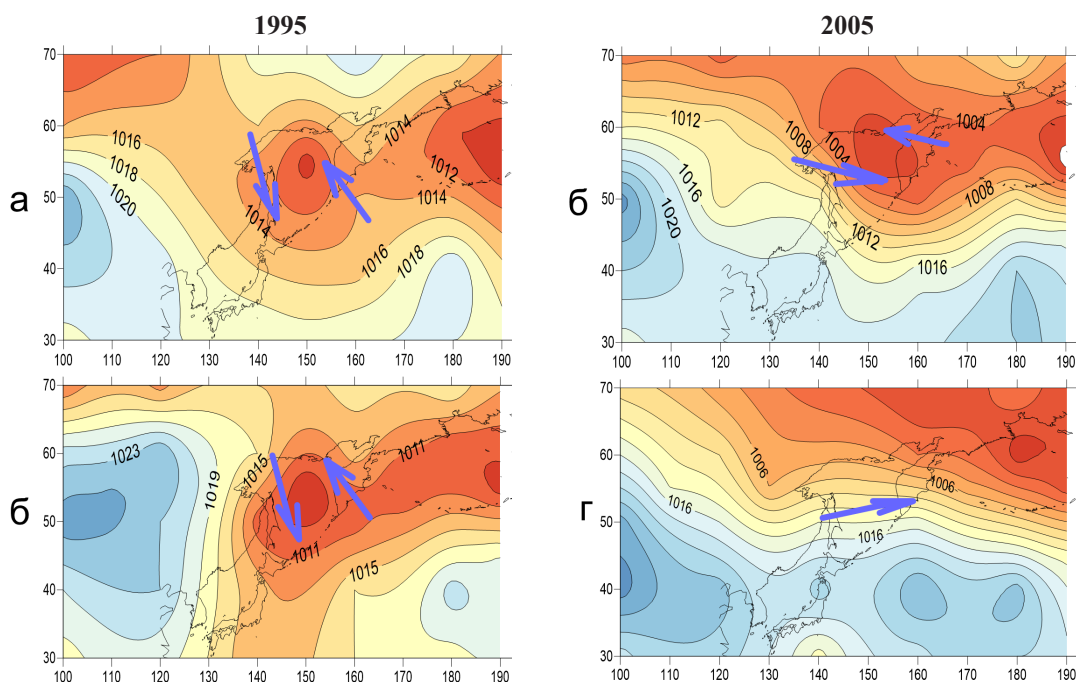


Рис. 10. Синоптические ситуации в октябре 1995 и 2005 гг. перед малоледовитыми зимами 1996 и 2006: а, б — первая декада октября (позже среднего срока на одну декаду); в, г — вторая декада октября (позже среднего срока на две декады)

Fig. 10. Synoptic situations in October 1995 and 2005 preceding the low-ice winters of 1996 and 2006: а, б — in early October (after usual timing); в, г — in middle October (after usual timing)

Закключение

Проведенный анализ позволяет сделать ряд ключевых выводов о механизмах формирования ледовитости Охотского моря. Центральную роль в образовании и развитии ледяного покрова играют два барических центра — Алеутская депрессия и Сибирский антициклон, интенсивность и взаимное положение которых в октябре-марте определяют характер переноса воздушных масс над регионом и, как следствие, термические условия, влияющие на льдообразование зимой.

Описаны синоптические условия и предпосылки для развития ледовитых и малоледовитых зим. В периоды экстремально высокой ледовитости (1977–1983 и 1998–2003 гг.) оба барических центра были максимально усилены, причем депрессия находилась в крайнем восточном положении, а у антициклона был аномально развит северный гребень, ориентированный на полярную область. При взаимодействии ЦДА над Охотским морем формируется контрастная градиентная зона, вдоль которой на акваторию поступает холодный арктический воздух, способствующий интенсивному выхолаживанию поверхности и быстрому льдообразованию. Кроме того, отличительной чертой холодных режимов является крайне редкий выход в акваторию циклонов и,

следовательно, отсутствие адвекции тепла на поверхность моря. Перестройка атмосферного режима происходит раньше среднемноголетних сроков на одну-две декады, и одновременно в полярных широтах формируется холодная область высокого давления (характерная особенность ледовитых зим).

В малоледовитые периоды (1989–1997 и 2004–2015 гг.) интенсивность обоих ЦДА была снижена, при этом Алеутская депрессия находилась юго-западнее своего среднемноголетнего положения. Как следствие, градиентная зона между атмосферными центрами была выражена слабо, а зимний муссон — малоактивен. На акваторию Охотского моря часто выходили циклоны, принося более теплые воздушные массы и способствуя развитию разнонаправленного ветрового переноса. Переход к северной (зимней) ветровой циркуляции происходил лишь в октябре (позже среднего срока); предосеннее барическое поле отличалось пониженным фоном давления в высоких широтах.

Условия для умеренной ледовитости (2016–2021 гг.) возникают при нормальном состоянии Алеутской депрессии, ослаблении северных гребней Сибирского антициклона, активном выходе циклонов на западные районы Берингова моря и поступлении в Охотское море умеренно-холодных берингоморских воздушных масс. Северный муссон устанавливается в среднемноголетние сроки (третья декада сентября).

Таким образом, сроки сезонной перестройки барических систем можно рассматривать как критический индикатор дальнейшего сценария развития ледовых условий, поскольку синоптическая ситуация в сентябре-октябре уже позволяет с достаточной степенью вероятности прогнозировать характер зимнего термического режима в Охотском море. Выявленная закономерность обладает прогностической значимостью и может быть использована в оперативной работе.

Благодарности (ANKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.
The authors are thankful to anonymous reviewers for their helpful comments.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.
The study has budget funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все приемлемые национальные, институциональные и международные этические принципы соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable national, institutional and international ethical guidelines are implemented. The authors declare they have no conflict of interests.

Информация о вкладе авторов (AUTHORS CONTRIBUTIONS)

С.Ю. Глебова — концепция исследования, сбор, обработка, анализ и интерпретация синоптических данных, написание текста статьи; Л.С. Муктепавел — сбор данных, анализ и интерпретация динамики ледовой информации в Охотском море, участие в написании и редактировании статьи.

S.Yu. Glebova — concept of the study, meteorological data collection, processing, analysis and interpretation, writing and illustrating the text; L.S. Muktepavel — collection, analysis and interpretation of the data on ice cover, partial writing the article.

Список литературы

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Исследование изменений климатических норм в долгосрочном прогнозе ледовитости Охотского моря // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2021. — № 3(381). — С. 99–114. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-3-99-114. EDN: JVPARR.

Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды : учеб. пособие. — Л. : Гидрометеиздат, 1978. — 344 с.

Глебова С.Ю. Влияние атмосферной циркуляции над дальневосточным регионом на характер изменения ледовитости в Охотском и Беринговом морях // Метеорол. и гидрол. — 2006. — № 12. — С. 54–60. EDN: KUNLZB.

Глебова С.Ю. Зимний циклогенез над океаном как фактор последующих изменений в атмосферном и термическом режиме дальневосточных морей и СЗТО (со сдвигом один год) // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 170. — С. 136–150. EDN: PDQWMB.

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 // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 153–166. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-153-166. EDN: XWBMQN.

Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Изв. ТИНРО. — 2009. — Т. 159. — С. 285–298. EDN: MNJQYP.

Куницын А.В. О количественной характеристике циклонической деятельности // Метеорол. и гидрол. — 1956. — № 6. — С. 29–30.

Мезенцева Л.И., Федулова А.С. Климатические тенденции атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке // Изв. КГТУ. — 2017. — № 46. — С. 175–183. EDN: WPCCJY.

Муктепавел Л.С. Пространственно-временная изменчивость ледовых условий Охотского моря по данным дистанционного зондирования : дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток, 2007. — 112 с.

Муктепавел Л.С. Региональные особенности ледовитости в Западно-Камчатской промысловой подзоне и термобарические условия их формирования // Тр. ВНИРО. — 2020. — Т. 180. — С. 128–139. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-180-128-139. EDN: NMYNTW.

Муктепавел Л.С., Шатилина Т.А. Некоторые закономерности формирования экстремально малоледовитых зим в Охотском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2009. — Т. 6, № 1. — С. 429–441. EDN: NDPXJL.

Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 228–239. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239. EDN: WCAHXP.

Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 167 с.

Полякова А.М. К сверхдолгосрочному прогнозу ледовитости дальневосточных морей // Вестн. ДВО РАН. — 2012. — № 6. — С. 3–12. EDN: PWZGHJ.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л. Изменчивость и современное состояние климата дальневосточных морей // Мат-лы Всерос. науч. конф. «Водные биологические ресурсы северной части Тихого океана: состояние, мониторинг, управление», посвящ. 80-летию юбилею ФГУП «КамчатНИРО». — Петропавловск-Камчатский : КамчатНИРО, 2012. — С. 498–508. EDN: QXMHZS.

Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Особенности атмосферной циркуляции и климата на Дальнем Востоке в начале 21-го века // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 152. — С. 225–239. EDN: JVUIFB.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950–1979 и 1980–2012 гг. // Метеорол. и гидрол. — 2016. — № 1. — С. 17–28. EDN: VECFWF.

Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Романюк В.А. Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря // Океанология. Геосистемы переходных зон. — 2024. — Т. 8, № 2. — С. 114–126. DOI: 10.30730/gtr.2024.8.2.114-126. EDN: VJIVYC.

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. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).6. EDN: CCTPFV.

References

Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N., Studying changes in climate normal in long-term forecasting of the Sea of Okhotsk ice cover, *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2021, no. 3(381), pp. 99–114. doi 10.37162/2618-9631-2021-3-99-114. EDN: JVPARR

Girs, A.A. and Kondratovich, K.V., *Metody dolgosrochnykh prognozov pogody* (Methods of Long-Term Weather Forecasts), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978.

Glebova, S.Yu., Study of atmospheric circulation in the Far Eastern region on the nature of ice cover changes in the Okhotsk and Bering Seas, *Meteorology and Hydrology*, 2006, no. 12, pp. 54–60. EDN: KUHLLZB

Glebova, S.Yu., Winter cyclogenesis over the ocean as a factor of subsequent changes in the atmospheric and thermal regime of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific (with one year lag), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 170, pp. 136–150. EDN: PDQWMB

Glebova, S.Yu., Cyclones over the Pacific Ocean and Far-Eastern Seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last two decade period, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 153–166. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-153-166. EDN: XWBMQH

Glebova, S.Yu., Ustinova, E.I., and Sorokin, Yu.D., Long-term tendencies of atmospheric processes and thermal regime in the Far-Eastern Seas of Russia in the last three decades, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2009, vol. 159, pp. 285–298. EDN: MNJQYP

Kunitsyn, A.V., On the quantitative characteristics of cyclonic activity, *Meteorol. Gidrol.*, 1956, no. 6, pp. 29–30.

Mezentseva, L.I. and Fedulova, A.S., Climatic trends of atmospheric circulation in the Far East, *Izv. KSTU*, 2017, no. 46, pp. 175–183. EDN: WPCCJY

Muktepavel, L.S., Spatio-temporal variability of ice conditions in the Sea of Okhotsk based on remote sensing data, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Vladivostok, 2007.

Muktepavel, L.S., Regional features of ice cover in the West Kamchatka fishing subzone with considering of the thermobaric conditions (according to the satellite data), *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 180, pp. 128–139. doi 10.36038/2307-3497-2020-180-128-139. EDN: NMYHTW

Muktepavel, L.S. and Shatilina, T.A., Some patterns of formation of extremely low-ice winters in the Sea of Okhotsk, *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 429–441. EDN: NDPXJL

Pishchalnik, V.M., Romanyuk, V.A., Minervin, I.G., and Batuhina, A.S., Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 185, pp. 228–239, doi 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239. EDN: WCAHXP

Plotnikov, V.V., *Izmenchivost' ledovykh uslovii dal'nevostochnykh morei Rossii i ikh prognoz* (Variability of Ice Conditions in the Far Eastern Seas of Russia and Prediction of Them), Vladivostok: Dal'nauka, 2002.

Polyakova, A.M., On superlong-term forecasts of the Far East seas ice extent, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2012, no. 6, pp. 3–12. EDN: PWZGHJ

Khen, G.V., Basyuk, E.O., Ustinova, E.I., and Figurkin, A.L., Variability and current state of the climate of the Far Eastern seas, in *Mater. Vseross. nauchn. konf. posvyashch. 80-letnemu yubileyu FGUP "KamchatNIRO" "Vodnye biologicheskie resursy severnoi chasti Tikhogo okeana: sostoyanie, monitoring, upravlenie"* (Proc. All-Russ. Sci. Conf. Commem. 80th Aniv. FGUP KamchatNIRO "Aquatic Biological Resources of the Northern Pacific Ocean: Status, Monitoring, and Management"), Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2012, pp. 498–508. EDN: QXMHZS

Shatilina, T.A. and Anzhina, G.I., Features of atmospheric circulation and climate in the Far East in the beginning of 21 century, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 152, pp. 225–239. EDN: JVUIFB

Shatilina, T.A., Tsitsiashvili, G.Sh., and Radchenkova, T.V., Estimating the trends and variability of atmospheric action centers over the Asian-Pacific region in summer in 1950–1979 and 1980–2012, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 1, pp. 10–18. doi 10.3103/S1068373916010027. EDN: WQFBEV

Shumilov, I.V., Minervin, I.G., Pishchalnik, V.M., and Romanyuk, V.A., Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk, *Geosistemy pereloma nykh zon. Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 114–126. doi 10.30730/ gtr.2024.8.2.114-126. EDN: VJIVYC

Shumilov, I.V., Pishchalnik, V.M., Romanyuk, V.A., and Nikulina, I.V., Cyclonic activity influence on the ice regime of the Sea of Okhotsk in the autumn-winter period, *Journal of Oceanological Research*, 2025, vol. 53, no. 4, pp. 98–114. doi 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).6. EDN: CCTPFV

Поступила в редакцию 30.04.2026 г.

После доработки 1.06.2026 г.

Принята к публикации 15.06.2026 г.

The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 1.06.2026;
accepted for publication 15.06.2026