

УДК 551.467

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА МОРЕЙ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИКИ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ, ЧУКОТСКОЕ) В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

Плотников Владимир Викторович^{1,2},
vlad_plot@poi.dvo.ru

Вражкин Александр Николаевич³,
avrzhkin@ferhri.ru

Мезенцева Людмила Ивановна^{3,2},
festfu@mail.ru

Друзь Наталья Ивановна³,
hydromet@mail.ru

Вакульская Надежда Михайловна¹,
vakulskaya@poi.dvo.ru

Дубина Вячеслав Анатольевич¹,
dubina@poi.dvo.ru

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Россия, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52Б.

³ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24.

Актуальность исследования. Богатая ресурсная база, большое транспортное и стратегическое значение Арктического бассейна и, в частности, морей восточной Арктики определяет актуальность и необходимость исследования изменчивости гидрометеорологического режима региона.

Целью работы является анализ изменчивости региональных показателей гидрометеорологического режима (ветровой режим, ледовые условия и характер перемешивания вод) на Восточно-Сибирском и Чукотском морях за последние несколько десятилетий (с 1979 по 2015 гг.).

Объектом исследования является комплекс наиболее значимых показателей, определяющих характер гидрометеорологических условий региона.

Методы. Для анализа изменчивости гидрометеорологического режима региона использовались методы многомерной статистики и моделирования.

Результаты. На основании всей доступной гидрометеорологической информации проведен анализ изменчивости основных региональных показателей гидрометеорологического режима.

Проведенные исследования свидетельствуют о направленных изменениях в показателях гидрометеорологического режима морей восточной Арктики:

- в характере и интенсивности атмосферной циркуляции над регионом (отмечается изменение характера и интенсивности ветрового режима);
- в ледяном покрове морей (идет активное уменьшение ледяного покрова);
- в характере и интенсивности волновой деятельности (за счет первых двух показателей наблюдается активизация волновой деятельности, выражаемой в существенном увеличении площади и глубины волнового перемешивания).

В дальнейшем полученные оценки могут быть использованы для реализации ряда вероятностно-статистических моделей изменчивости гидрометеорологического состояния, а также при решении ряда практических задач, хозяйственного освоения акваторий морей восточной Арктики.

Ключевые слова:

Гидрометеорологический режим, ледовитость, ветровое перемешивание, Чукотское и Восточно-Сибирское моря, атмосферная циркуляция.

Введение

На особенности гидрометеорологического и ледового режимов арктических морей обращали внимание многие исследователи [1–28]. При этом отмечалось, что изменения этих режимов наиболее ярко проявились в арктических широтах.

В связи с этим оценка и анализ многолетней изменчивости комплекса отмеченных показателей, а также сопряженности процессов в атмосфере, ледяном покрове и водной среде на Восточно-Сибирском и Чукотском морях в современный период представляют несомненный интерес.

Режим ветра и его тенденции

Анализ атмосферной циркуляции над Арктическим бассейном показал весьма неоднозначные результаты [1, 3–5, 8, 9, 11, 18, 20–22, 29–31]. Для детализации и обобщения сведений о характере атмосферной циркуляции над восточным сектором Арктики, на основе данных реанализа Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECWMF) ERA-Interim [31], были рассчитаны режимные характеристики ветра над Чукотским и Восточно-Сибирским морями. Данные ERA-реанализа содержат набор параметров в узлах регулярной сетки по всему Земному шару с шагом $0,75^\circ$ по широте и долготе для 4-х сроков за сутки с 1979 г. по настоящее время. Эти условия перенесены на приведенные здесь расчетные характеристики ветра.

В работе были рассчитаны основные параметры ветра на уровне 10 м над поверхностью моря для каждого месяца: средняя и максимальная скорости, результирующий ветер, двумерные повторяемости для построения роз ветра. Основное внимание уделялось периоду года, когда моря являются судоходными или частично судоходными, т. е. периоду с июня по ноябрь.

Данные о среднем ветре и розы ветров для июля, сентября и ноября (рис. 1, а–в) позволяют представить режим ветра и некоторые особенности атмосферной циркуляции над указанными районами. Розы ветров на этих рисунках построены для отдельных точек моря, а в табл. 1 представлены усредненные по небольшому району моря некоторые характеристики ветра. Эти районы равноценны по числу входящих в них узлов сетки (рис. 1, г). Период обобщений – с 1979 по 2015 гг.

Средняя скорость ветра для летних месяцев по рассматриваемым акваториям распределена в пределах 5–6 м/с и слегка нарастает осенью над Восточно-Сибирским морем. Для Чукотского моря осенью характерно значимое усиление ветров, наиболее заметное для южной части моря (средняя скорость ветра в октябре–ноябре достигает 8–9 м/с). Осредненные значения максимальных значений скорости ветра в летний период близки к 12 м/с. Осенью отмечается нарастание средних максимальных скоростей ветра для Восточно-Сибирского моря до 14–15 м/с, для Чукотского моря до 15–17 м/с. Абсолютные максимумы скорости ветра за навигационный период также приходятся на конец осени, достигают штормовых значений 25–29 м/с.

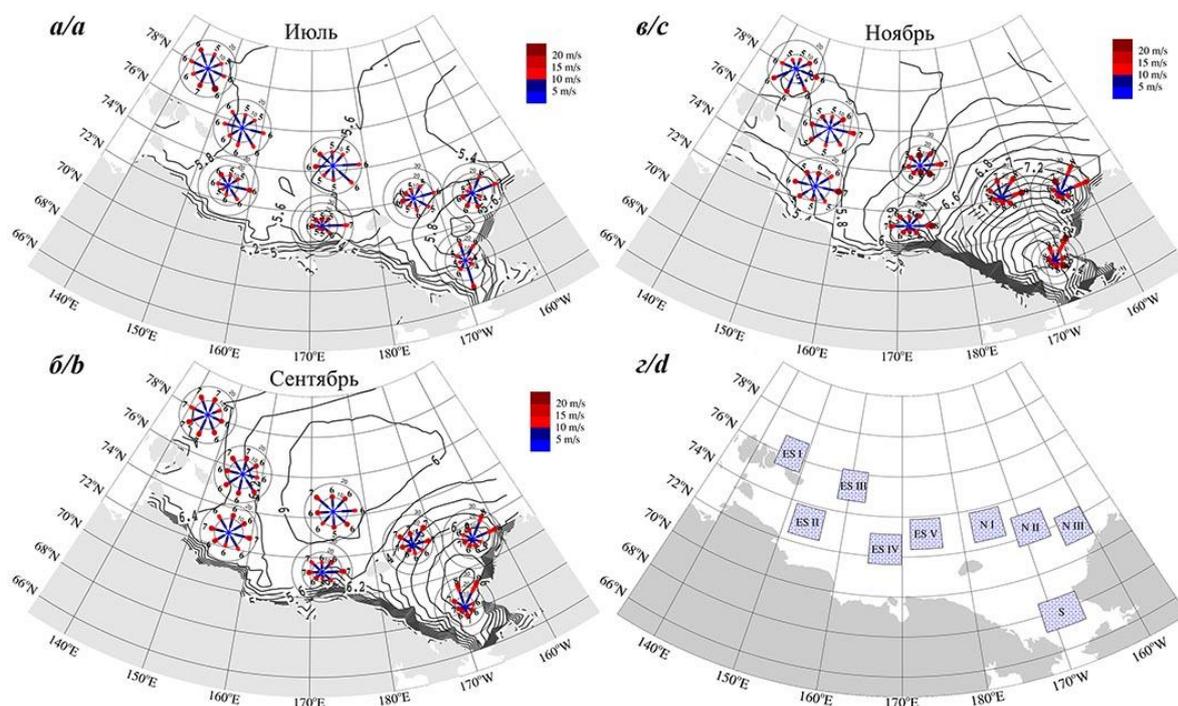


Рис. 1. Средняя скорость ветра для Чукотского и Восточно-Сибирского морей и розы ветров в июле (а), сентябре (б) и ноябре (в). Изоахи проведены через 0,2 м/с для скоростей ветра более 5 м/с и через 0,5 м/с для скоростей менее 5 м/с; на лучах роз ветров указана средняя скорость данного направления ветра. (г) Районы Чукотского и Восточно-Сибирского морей

Fig. 1. Average wind speed for the Chukchi and East Siberian Seas and wind roses in July (a), September (b) and November (c). Isotaches are drawn through 0,2 m/s for wind speeds greater than 5 m/s and through 0,5 m/s for speeds less than 5 m/s; rays of wind roses show average speed of a given wind direction. (d) Areas of the Chukchi and East Siberian Seas

Преобладающими направлениями ветра в июне и июле для большей части рассматриваемой акватории являются SE-E румбы, для северных районов Восточно-Сибирского моря – преимущественно S. В августе над южной половиной Восточно-

Сибирского моря и большей частью Чукотского моря результирующим становится NE-E ветер; на севере морей ветер крайне неустойчив, его результирующее направление зависит от периода усреднения. В сентябре Чукотское море во власти устойчивых

NE-N и E ветров, и эта циркуляция сохраняется все осенние и зимние месяцы. Для юго-восточной части Восточно-Сибирского моря в осенние месяцы и в начале зимы характерны эти же направления ветра – N-NE-E. Для других районов Восточно-Сибирского

моря результирующий ветер зависит от периода усреднения, можно выделить преобладание E, NE ветров на северо-востоке моря в октябре–ноябре, чаще всего южных четвертей на северо-западе акватории и SW на юго-западе.

Таблица 1. Средняя и максимальная скорость ветра и преобладающие направления по районам Чукотского и Восточно-Сибирского морей

Table 1. Average and maximum wind speed and prevailing directions in the Chukchi and East Siberian Seas

| Районы Areas | Месяц/Month | | | | | | |
|---|-------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|
| | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Чукотское море/Chukchi Sea | | | | | | | |
| Средняя скорость ветра, м/с/Average wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 5,3 | 5,4 | 5,8 | 6,2 | 6,7 | 6,9 | 6,5 |
| NIИ | 5,3 | 5,5 | 6,1 | 6,7 | 7,4 | 7,5 | 7,0 |
| NIИИ | 5,5 | 5,6 | 6,1 | 6,8 | 7,5 | 7,3 | 7,1 |
| S | 5,2 | 5,5 | 6,0 | 7,1 | 8,0 | 8,8 | 8,5 |
| *Средняя из максимальных скорость ветра, м/с/Average of maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 11,8 | 12,1 | 12,9 | 13,3 | 14,4 | 15,2 | 14,9 |
| NIИ | 11,5 | 12,0 | 13,3 | 14,1 | 14,9 | 15,8 | 15,7 |
| NIИИ | 11,9 | 12,0 | 13,2 | 14,0 | 15,3 | 15,6 | 15,9 |
| S | 11,7 | 12,0 | 13,0 | 14,6 | 16,2 | 17,3 | 17,2 |
| **Максимальная скорость ветра, м/с/Maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 17 | 21 | 19 | 19 | 29 | 22 | 27 |
| NIИ | 15 | 20 | 19 | 20 | 22 | 23 | 27 |
| NIИИ | 18 | 19 | 20 | 19 | 22 | 24 | 26 |
| S | 19 | 16 | 20 | 18 | 22 | 26 | 27 |
| Повторяемость сильного ветра (≥ 17 м/с) в %/High wind repeatability (≥ 17 m/s) in % | | | | | | | |
| NI | 0,01 | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,3 | 0,7 | 0,4 |
| NIИ | – | 0,04 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| NIИИ | 0,00 | 0,03 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 0,7 |
| S | 0,02 | 0,7 | 0,05 | 0,4 | 0,8 | 1,7 | 2,0 |
| ***Преобладающее направление/Prevailing direction | | | | | | | |
| NI | SE | SE | ENE, последние годы last years WNW | NW, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NE | NE |
| NIИ | SE | SE | E, последние годы last years неустойчивый unstable | NNE, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NE | NE |
| NIИИ | E | SE и E | E и SE | NE, последние годы last years NEE | NEE | NEE | NEE |
| S | NE | Неустойчивый unstable, последние годы last years S | NE | NE | NE | NE | NE |
| Восточно-Сибирское море/East Siberian Sea | | | | | | | |
| Средняя скорость ветра, м/с/Average wind speed, m/s | | | | | | | |
| ESI | 5,9 | 5,9 | 6,1 | 6,5 | 6,3 | 5,8 | 5,9 |
| ESII | 5,7 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,0 | 5,6 | 5,5 |
| ESIII | 5,8 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 5,9 | 5,8 | 5,8 |
| ESIV | 5,6 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | 5,9 | 6,1 | 6,0 |
| ESV | 5,6 | 5,6 | 5,8 | 6,0 | 6,0 | 6,3 | 6,1 |
| Средняя из максимальных скорость ветра, м/с/Average of maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| ESI | 12,9 | 12,6 | 13,2 | 13,7 | 14,3 | 13,1 | 14,0 |
| ESII | 12,2 | 12,1 | 12,5 | 13,7 | 13,5 | 13,4 | 13,8 |
| ESIII | 12,8 | 12,1 | 12,8 | 13,6 | 13,9 | 13,4 | 13,7 |
| ESIV | 11,8 | 12,1 | 12,6 | 13,2 | 13,4 | 14,1 | 14,8 |
| ESV | 11,9 | 12,1 | 12,7 | 13,1 | 13,8 | 14,6 | 14,8 |
| Максимальная скорость ветра, м/с/Maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| ESI | 20 | 19 | 20 | 19 | 20 | 20 | 24 |
| ESII | 18 | 17 | 17 | 21 | 21 | 22 | 25 |
| ESIII | 18 | 17 | 18 | 23 | 19 | 25 | 26 |
| ESIV | 18 | 19 | 18 | 18 | 24 | 24 | 27 |
| ESV | 18 | 19 | 17 | 18 | 21 | 23 | 23 |
| Повторяемость сильного ветра (≥ 17 м/с) в %/High wind repeatability (≥ 17 m/s) in % | | | | | | | |
| ESI | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,4 |
| ESII | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| ESIII | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,4 |
| ESIV | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,3 | 0,3 | 0,5 |
| ESV | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,03 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |

| Районы Areas | Месяц/Month | | | | | | |
|-----------------|--|--------------------------------------|--|---|---|---|---|
| | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| | Преобладающее направление/Prevailing direction | | | | | | |
| ES I | S, последние годы last years SE | SE | NWW, последние годы last years SE | SWW, последние годы last years SWS | S | SE, последние годы last years S | S, последние годы last years SW |
| ES II | E, SE, последние годы last years E | ESE, последние годы last years E | NE, последние годы last years E | Неустойчивые unstable разных направлений different directions | SSW, последние годы last years E и ENE | E, последние годы last years W неустойчивый unstable | S-SW, последние годы last years W |
| ES III | S, последние годы last years SE | SES, последние годы last years SE | NWW, последние годы last years E неустойчивые | NW, последние годы last years SEE | SSE, последние годы last years SE | ESE, последние годы last years ENE | SE, последние годы last years неустойчивый unstable |
| ES IV | E, последние годы last years SEE | E | NE, последние годы last years NEE | N, последние годы last years NE | E, последние годы last years ENE | E, последние годы last years NE | ENE, последние годы last years NEN |
| ES V | SE | SE, последние годы last years ESE | Разных направлений, последние годы last years NE | NW, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NEE, последние годы last years NE | ENE, последние годы last years NEN |

Примечание: *Средняя из максимальных скорость ветра – максимальная скорость ветра за отдельный месяц, усредненная за период лет; **Максимальная скорость ветра – абсолютный максимум скоростей ветра для данного месяца; ***Последние годы – период позже 1996 г.

Note: * Average of the maximum wind speeds – the maximum wind speed for a single month, averaged over a period of years; ** Maximum wind speed – the absolute maximum of wind speeds for a given month; *** Last years – the period after 1996

Для проверки гипотезы об изменении атмосферной циркуляции над полярными районами в пределах периода исследования оценивались изменения результирующего ветра, в том числе исследовались временные ряды компонент (меридиональной и зональной компоненты) результирующего ветра для отдельных месяцев.

На рис. 2 представлены накопленные аномалии меридиональной (v) компоненты ветра над разными районами Чукотского моря (районы соответствуют рис. 1, з). Ход кривой вниз следует понимать как преобладание отрицательных аномалий компоненты v (усиление северной или ослабление южной составляющей ветра), вверх – преобладание положительных аномалий (ослабление северной или усиление южной составляющей ветра). При расчете аномалий в качестве нормы использованы средние многолетние значения за весь период обобщений.

Анализ кривых позволяет выявить несовпадающие от месяца к месяцу часто асинхронные периоды преобладания аномалий одного знака, равные примерно 8–12 годам (рис. 2). Так, для июля можно выделить период с 2000 по 2011 гг., для юга Чукотского моря – с 1997 по 2011 гг., когда доминировали отрицательные аномалии компоненты v – ослабевала южная составляющая ветра. На более раннем этапе, с 1983 по 1996 гг., преобладали положительные аномалии компоненты v – южная составляющая ветра часто была значительной. Для сентября за исследуемые 37 лет выделяются четыре периода с преобладанием аномалий одного знака. С 1979 по 1988 гг. преобладали положительные аномалии компоненты v , в период 1990–1996 гг. – отрицательные, с 1997 до 2010 гг. – опять положительные, и последние 5 лет над всеми районами Чукотского моря ежегодно отмечались отрицательные аномалии (что указывает на усиление ветров северной четверти).

Частое повторение сдвигов ветра на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка. Результирующий ветер, рассчитанный для периодов 1979–1996 гг. и 1997–2015 гг. для акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей для навигационных месяцев, представлен на рис. 3. Анализ карт позволяет выявить ряд изменений основных воздушных течений у поверхности Земли над регионом исследования от 1979–1996 гг. (период I) к 1997–2015 гг. (период II) и, следовательно, изменение положения дирижирующих барических объектов. В июне и июле, например, над северными акваториями обоих морей отмечался устойчивый по территории левый поворот результирующего ветра от периода I ко II-му периоду (рис. 3, а, б), что указывает на смещение полярного североамериканского антициклона от традиционного местоположения в восточный сектор Российской Арктики.

В августе в течение периода I над Восточно-Сибирским морем преобладал антициклонический характер циркуляции. Движение воздуха осуществлялось относительно ядер, расположенных юго-восточнее Новосибирских островов, примерно на 74° – 75° с.ш., и на востоке моря на широте 73° – 74° . Ось гребня, ориентированная вдоль 73-й широты, распространялась на север Чукотского моря. На северной периферии гребня преобладали ветры западных румбов, на южной – северо-восточные, восточные. Позже 1976 г. пояс повышенного давления сместился к северу, примерно на 76° с.ш.; вслед за ним результирующие ветры над большей частью акваторий обоих морей сменили направление на восточное (рис. 3, в). Похожие тенденции с большими сдвигами ветра от одного периода к другому прослеживаются и в сентябре (рис. 3, з). Можно заметить смещение цик-

лонического вихря, регулирующего воздушные течения на юге Чукотского моря в августе, на восток вдоль 67° с.ш., что определило левый поворот ветра в этом районе Чукотского моря.

В сентябре и октябре над Чукотским морем сдвиги ветра умеренные одного знака – имеет место правый поворот ветра на 20° – 30° . В этот период над морем устанавливается зимняя циркуляция с преобладанием ветров NE четверти, регулирует воздушные течения алеутский минимум. Правый поворот ветра, вероятно, объясняется наличием и преобладанием в течение II периода пояса повышенного давления к северу от моря. Сдвиги ветра в этот период сопровождались его усилением, особенно заметным в октябре. В октябрь–ноябре в течение периода II над Чукотским морем севернее 68° с.ш. средние скорости ветра были больше на $0,6$ – $1,4$ м/с по отношению к периоду I (рис. 3, *д*, *е*).

На северо-западе Восточно-Сибирского моря в сентябре и над большей его частью в октябре имеют место сдвиги ветра другого знака, наблюдается левый поворот ветра (рис. 3, *з*, *д*). В октябре, кроме этого, над всей акваторией моря ветер стал сильнее на

$0,4$ – $1,0$ м/с. Здесь ответственной барической системой является циклоническая система над морем Лаптевых в сочетании с полярным антициклоном.

Подводя итоги, можно отметить следующее. Частое повторение сдвигов ветра (характерно для большинства месяцев большей части выделенных акваторий) на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка, 1979–1996 и 1997–2015 гг., в рамках которых положение дирижирующих барических объектов и, как следствие, результирующий ветер различаются. В теплый сезон на большей части морей российской Восточной Арктики от первого периода ко второму прослеживается тенденция к возрастанию повторяемости ветров восточной четверти, что указывает на преобладание зональных форм циркуляции. Кроме этого, в осенние месяцы отмечается значимое усиление ветров, преобладающее направление которых северо-восточное. В Восточно-Сибирском море – 14 – 15 м/с, в Чукотском море – до 15 – 17 м/с. Абсолютные максимумы скорости ветра также приходятся на конец осени и достигают штормовых значений 25 – 29 м/с.

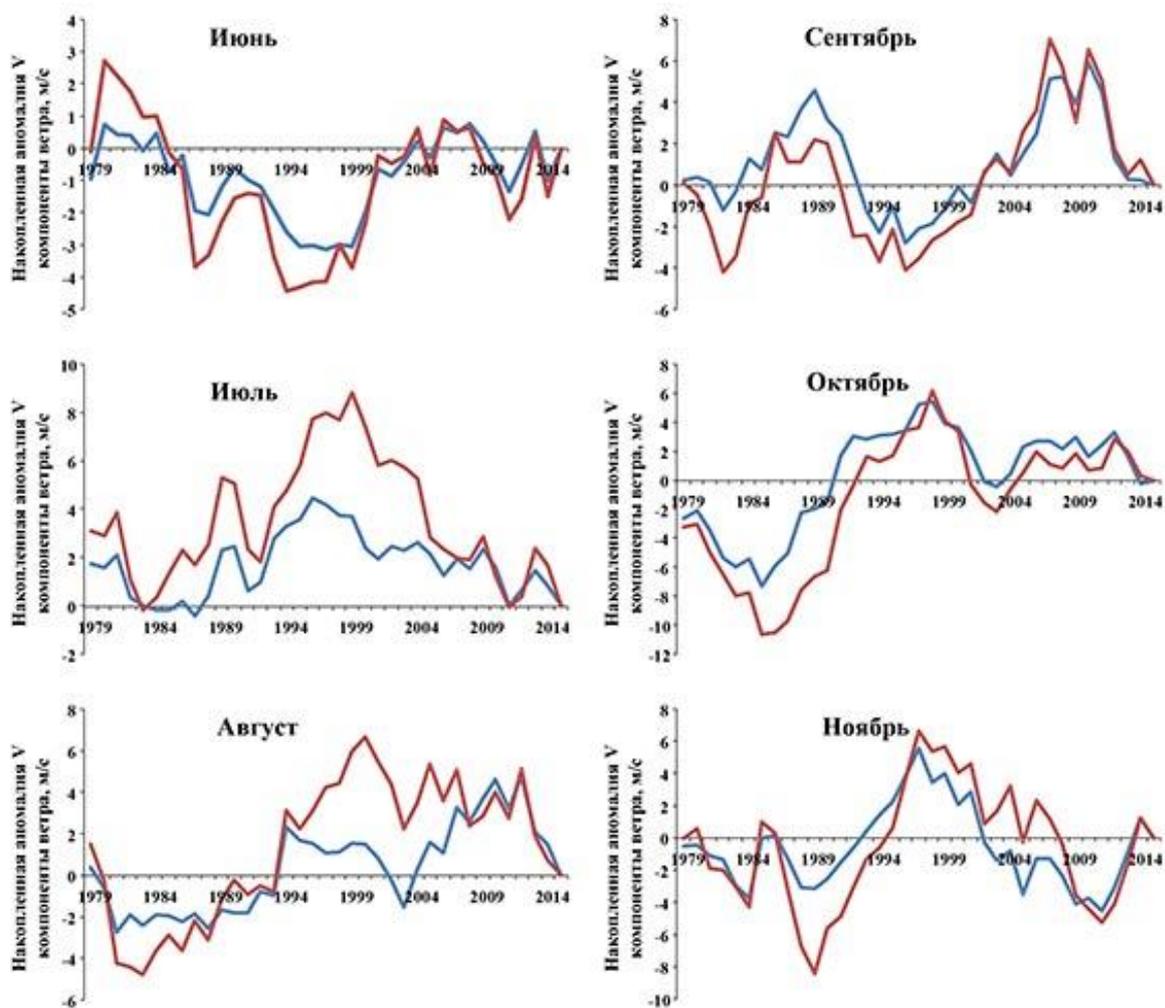


Рис. 2. Накопленные аномалии меридиональной компоненты ветра для отдельных районов Чукотского моря (сплошная линия – все районы моря, пунктирная линия – юг моря) в июне–ноябре

Fig. 2. Accumulated anomalies of the meridional wind component for some areas of the Chukchi Sea (solid line – all areas of the sea, dashed line – south of the sea) in June–November

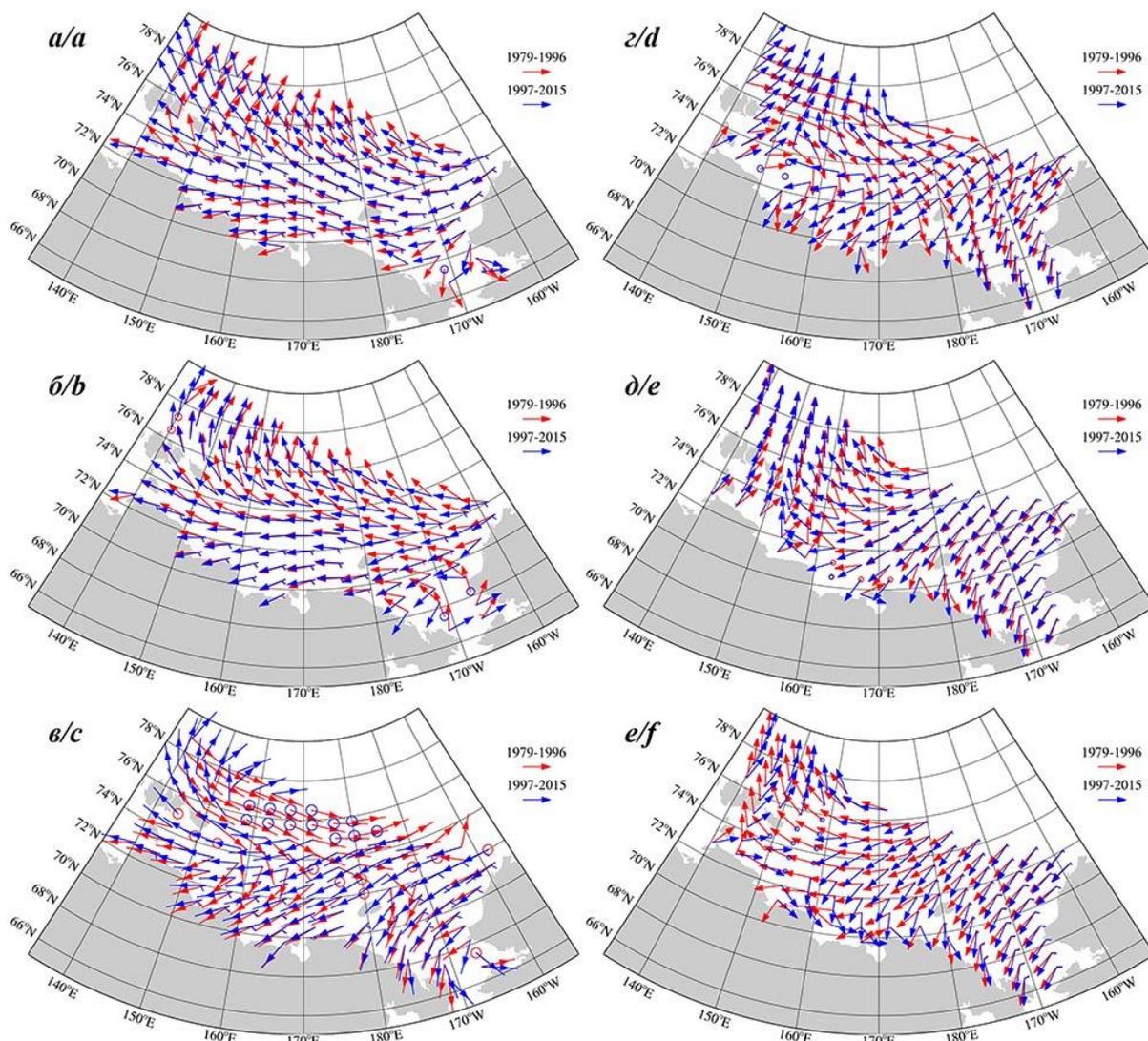


Рис. 3. Результирующий ветер над Восточной Русской Арктикой для июня (а), июля (б), августа (в), сентября (г), октября (д) и ноября (е)

Fig. 3. Resulting wind over the Eastern Russian Arctic for June (a), July (b), August (c), September (d), October (e) and November (f)

Ледовые условия

Для оценки изменчивости ледового режима в современный период привлекались данные о ледовых условиях за последние несколько десятилетий – 37 лет (1979–2015 гг.).

Изменчивость ледового режима акваторий оценивалась по характеру распределения ледовитостей за теплый период (июнь–ноябрь) (рис. 4).

Из анализа распределений (рис. 4, табл. 2) следует, что вероятность проявления тренда увеличивается с запада на восток. При этом замедление процесса разрушения льда в Восточно-Сибирском море (незначительный положительный тренд) сопровождается ускорением этого процесса в Чукотском море. Данный эффект является проявлением разницы в возрастном составе льдов в морях. В Чукотском море на начало таяния преобладают однолетние льды средней толщины (до 120 см), а в Восточно-Сибирском море в это же время преобладают однолетние толстые льды

(более 120 см). Более тонкий ледяной покров, а также разрушающее, за счет переноса, воздействие вод тихоокеанского бассейна приводит к более быстрому сокращению ледовитости в Чукотском море.

Сравнительный анализ результатов с ранее рассчитанными оценками [28] свидетельствует об интенсификации деструктивных процессов в ледяном покрове исследуемых морей с течением времени (табл. 2).

Динамическое перемешивание вод

При расчёте динамического перемешивания в морях восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское моря) использовались модельные данные, полученные по спектральной дискретной модели WAVEWATCH III [32], на сетке с шагом 20×10 минут.

В качестве входной информации использовались поля приводного ветра (Архив ERA-Interim) и распределения сплочённости льда (Национальный ледовый центр США).

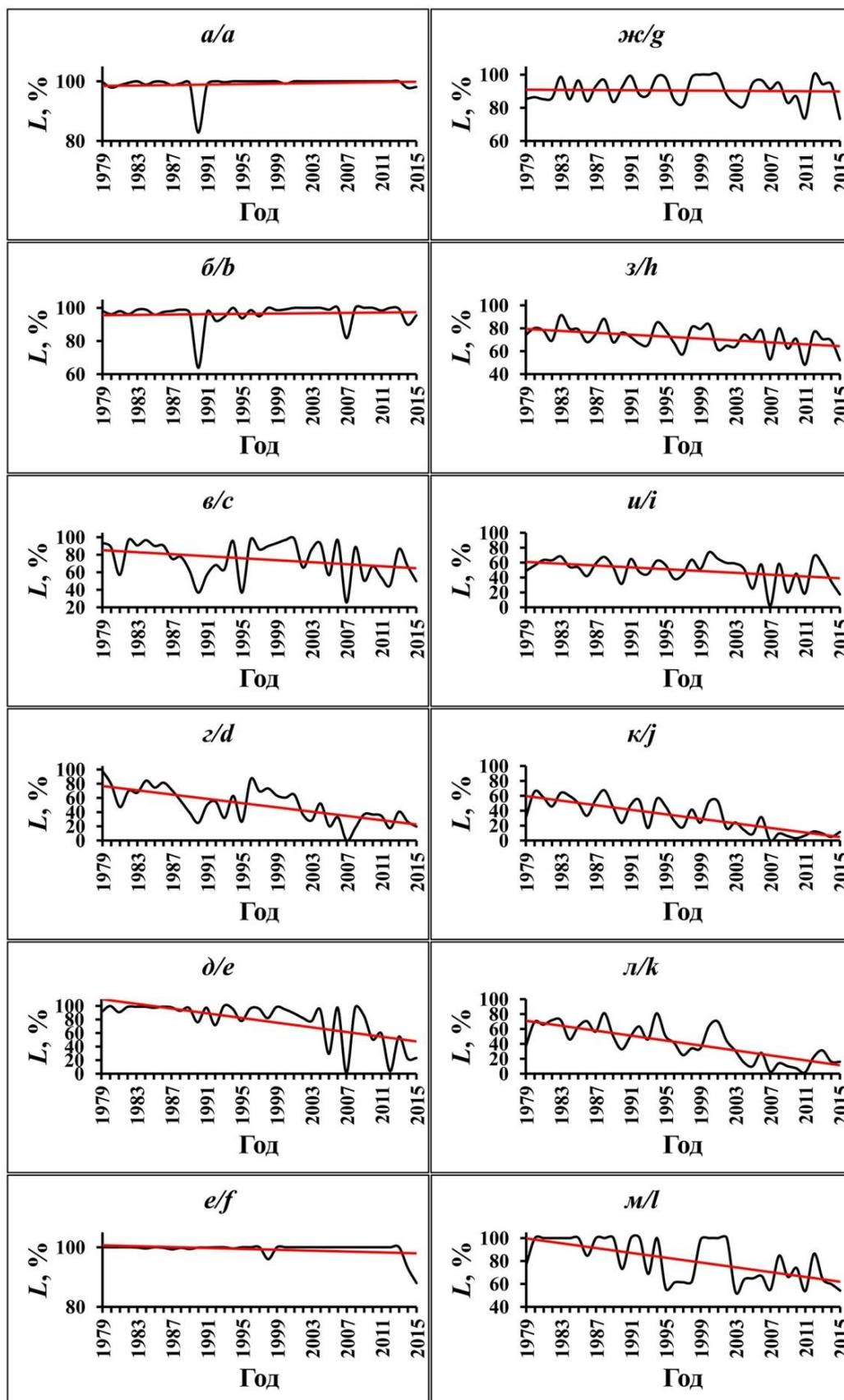


Рис. 4. Многолетние распределения ледовитостей (L , %) в Восточно-Сибирском (а–е) и Чукотском (ж–м) морях и их линейный тренд (красная линия) в июне (а, ж), июле (б, з), августе (в, и), сентябре (д, л) и ноябре (е, м)

Fig. 4. Long-term distributions of ice cover (L , %) in East Siberian (a–f) and Chukchi (g–l) Seas and their linear trend (red line) in June (a, g), July (b, h), August (c, i), September (d, j), October (e, k) and November (f, l)

Таблица 2. Сравнительные оценки распределений ледовитости Чукотского и Восточно-Сибирского морей за периоды 1979–2015 гг. (а) и 1950–2008 гг. (б), их трендовой составляющей и вероятности ее проявления

Table 2. Comparative estimates of ice cover distributions in the Chukchi and East Siberian seas over the periods of 1979–2015 (a) and 1950–2008 (b), their trend component and the probability of its demonstration

| Оценки Estimates | Июнь June | Июль July | Август August | Сентябрь September | Октябрь October | Ноябрь November |
|--|--------------|--------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| a/a 1979–2015 | | | | | | |
| Восточно-Сибирское море East Siberian Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 99,1 | 96,3 | 74,8 | 49,6 | 78,8 | 99,3 |
| σ_i | 2,8 | 6,7 | 20,7 | 23,7 | 28,5 | 2,3 |
| α | 0,029 | 0,057 | -0,478 | -1,204 | -1,383 | -0,060 |
| σ_α | 0,043 | 0,102 | 0,305 | 0,270 | 0,336 | 0,033 |
| P (%) | 50 | 42,5 | 88,4 | 99,9 | 99,9 | 93,1 |
| Чукотское море Chukchi Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 91,7 | 71,3 | 50,2 | 31,4 | 41,3 | 80,5 |
| σ_i | 7,6 | 9,7 | 16,7 | 20,7 | 24,1 | 17,2 |
| α | -0,101 | -0,283 | -0,504 | -1,143 | -1,311 | -0,700 |
| σ_α | 0,116 | 0,137 | 0,236 | 0,213 | 0,254 | 0,222 |
| P (%) | 61,6 | 96 | 96,8 | 99,99 | 99,99 | 99,8 |
| б/б 1950–2008 | | | | | | |
| Восточно-Сибирское море East Siberian Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 98,5 | 96,1 | 79,4 | 61,6 | 91,2 | 99,9 |
| σ_i | 3,2 | 5,8 | 17,1 | 21,7 | 16,8 | 0,5 |
| α | 0,032 | 0,005 | -0,082 | -0,528 | -0,279 | -0,005 |
| σ_α | 0,024 | 0,044 | 0,130 | 0,146 | 0,121 | 0,004 |
| P (%) | 81 | 10 | 47 | 99,9 | 98 | 78 |
| Чукотское море Chukchi Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 92,5 | 75,8 | 57,5 | 44,4 | 56,1 | 91,0 |
| σ_i | 6,5 | 8,7 | 14,2 | 18,8 | 20,8 | 15,4 |
| α | -0,023 | -0,139 | -0,272 | -0,477 | -0,616 | -0,422 |
| σ_α | 0,049 | 0,063 | 0,100 | 0,125 | 0,130 | 0,099 |
| P (%) | 36 | 97 | 99 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |

Примечание: L_{cp} – среднее значение ледовитости, σ_i – стандартное отклонение, α и σ_α – параметры тренда (угол наклона и среднеквадратичная погрешность оценки угла наклона, соответственно), P – вероятность проявления тренда.

Note. L_{cp} – average value of ice cover, σ_i – standard deviation, α and σ_α – the trend parameters (the angle of inclination and the root-mean-square error in estimating the angle of inclination, respectively), P – probability of trend presence.

Оценка результатов проводилась по данным инструментальных наблюдений с буёв (Shell Arctic Stations, № 48213, 48214) за 2015 г.

Анализ показал высокую степень адекватности рассчитанных и определенных в результате инструментальных наблюдений величин: для высот волн коэффициент корреляции оказался равен 0,95 при среднеквадратической ошибке 0,19 м; для периодов волн коэффициент корреляции соответствовал величине 0,91 при среднеквадратической ошибке 1,28 секунд.

Увеличение площади акваторий свободных ото льда при соответствующих синоптических условиях

(см. предшествующие разделы) способствует интенсификации волновых процессов [20–22, 29, 30]. На основе спутниковых данных [33] было получено, что начиная с 1996 г. наблюдается восходящий тренд для высот волн и скорость их роста составляет 0,1 м в десятилетие.

На морях восточного сектора Арктики с июня по ноябрь отмечаются заметные акватории, или полностью свободные ото льда, или имеющие незначительный ледяной покров со сплоченностью менее трех баллов, на которых может генерироваться волнение. Наиболее активно процесс очищения ото льда, а следовательно, и процесс волнообразования происходит с августа по октябрь, где в отдельные годы на более чем 3/4 площади акваторий наблюдается волнение. Например, в ноябре в восточной части Восточно-Сибирского моря высота волн может достигать 3 м, а в южной части Чукотского моря даже в конце ноября возможны волны до 6 м. В табл. 3 приведены средние и максимальные высоты волн с 2000 г.

Таблица 3. Средние и максимальные высоты значительных волн и глубины динамического перемешивания в Восточной Арктике

Table 3. Average and maximum heights of significant waves and depths of dynamic mixing in the Eastern Arctic

| Месяц/Month | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Средняя высота (м) Average height (m) | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,6 |
| Максимальная высота (м) Maximum height (m) | 3,2 | 3,9 | 4,8 | 4,9 | 5,4 | 6,6 | 4,4 |
| Средняя глубина перемешивания (м) Average depth of mixing (m) | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 12 | 15 |
| Максимальная глубина перемешивания (м) Maximum depth of mixing (m) | 29 | 35 | 45 | 46 | 53 | 64 | 44 |

При расчёте глубины волнового перемешивания использовалась теория нелинейных волн конечной амплитуды Стокса. Волнение приводит к орбитальным движениям частиц воды. На глубокой воде это окружность, на мелководье – эллипс. При увеличении амплитуды траектории частиц становятся незамкнутыми и возникает волновое течение, называемое стоковым. Средняя скорость этого течения на глубокой воде [34]:

$$u = \pi^2 \delta^2 c e^{-2\pi z}$$

На мелкой воде стоковое волновое течение имеет вид:

$$u = \pi^2 \delta^2 c \frac{\operatorname{ch}(2k(H-z))}{2\operatorname{sh}^2(kH)},$$

где δ – крутизна волны; c – фазовая скорость; H – глубина моря; z – вертикальная координата движения частицы воды; k – волновое число. Символами ch и sh обозначены гиперболический косинус и гиперболический синус, соответственно.

Подставив в эти уравнения характеристики волнения, несложно получить глубину (z), на которой скорость равна нулю. Эта глубина и является предельной характеристикой волнового перемешивания. Макси-

мальные глубины динамического перемешивания с начала XXI в. в Восточном секторе Арктики приведены на рис. 5.

С августа перемешивание достигает 20–25 метровой изобаты и в октябре увеличивается до 35 метровой, а в Чукотском море до 40–50 м. Средняя глубина динамического перемешивания с сентября по ноябрь в Чукотском море (по нашим расчетам) составляет 10–15 м, а максимум достигает дна (более чем 40 м). Однако в расчетах не учитывается плотность воды. Орбитальное движение с глубиной вовлекает новые

частицы и способствует перемешиванию слоев воды с различной плотностью. Высокие и длинные волны способны вызвать перемешивание и на больших глубинах. Принято считать, что глубина динамического перемешивания, вызванного волнением, составляет половину длины волны, однако, как сказано в [35], толщина слоя может быть соизмерима с длиной волны. Кроме того, дополнительно необходимо учитывать то, что максимальная глубина перемешивания получена по экстремальным характеристикам волн, которые не повторяются из года в год на всей акватории моря.

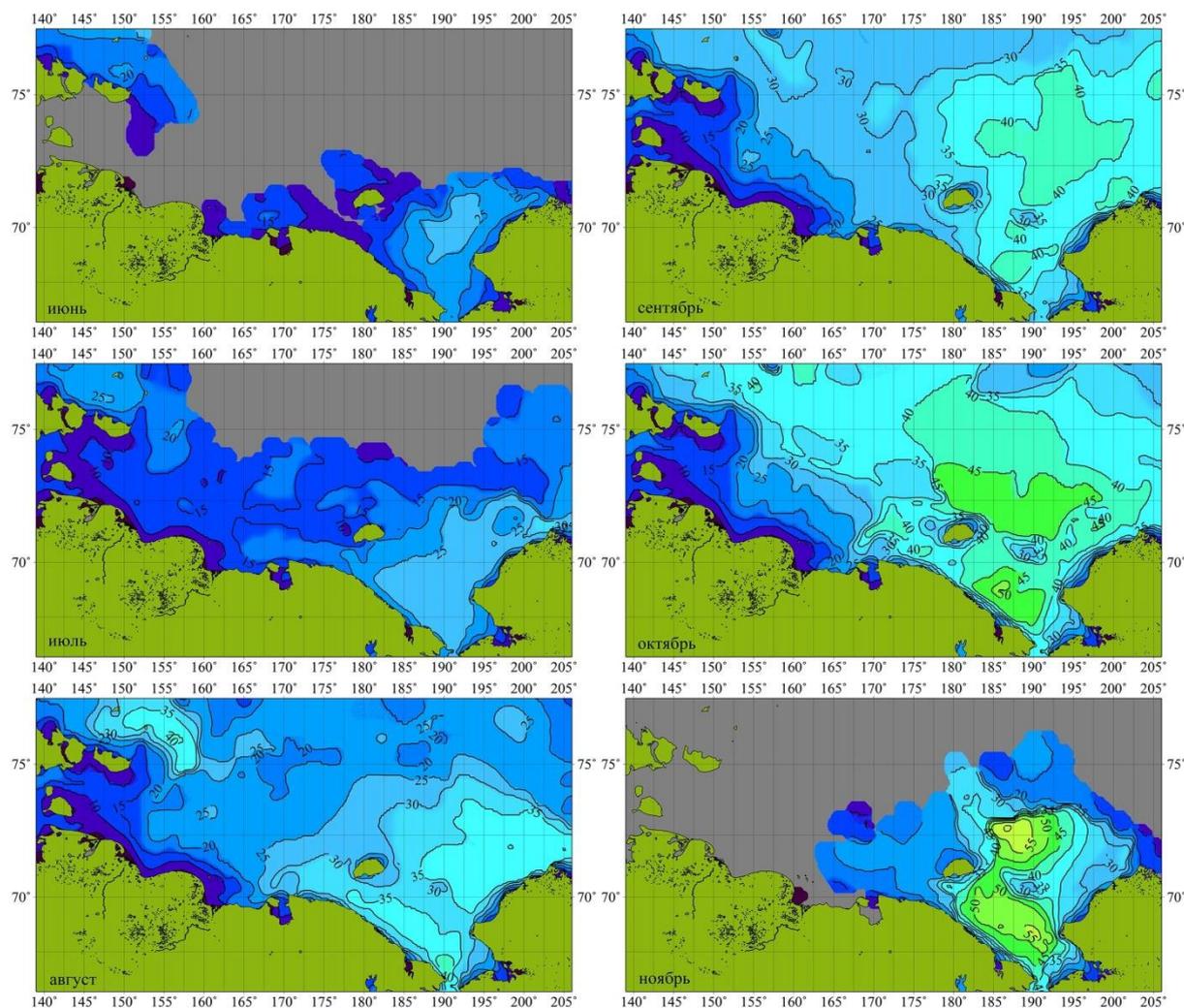


Рис. 5. Максимальная глубина волнового перемешивания в морях восточного сектора Арктики в июне–ноябре

Fig. 5. Maximum depth of wave mixing in the seas of East Arctic sector in June–November

Заключение

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. В морях восточного сектора Арктики происходит усиление деструктивных процессов в ледяном покрове.
2. Различия процессов разрушения льда в Восточно-Сибирском и Чукотском морях является проявлением разницы в возрастном составе льдов. В Чукотском море на начало таяния преобладают однолетние льды средней толщины (до 120 см), а в

Восточно-Сибирском море преобладают однолетние толстые льды (более 120 см). Более тонкие льды и влияние тихоокеанского бассейна приводит к более быстрому сокращению ледовитости в Чукотском море по сравнению с Восточно-Сибирским морем.

3. Частое повторение сдвигов ветра на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка – 1979–1996 и 1997–2015 гг., в которых положения дирижирующих барических объектов и,

как следствие, результирующий ветер на акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей для навигационного сезона различаются.

4. За счет изменения ветрового и термического режимов, уменьшения площади ледяного покрова произошло увеличение площади и интенсивности ветрового перемешивания.
5. Активность волновой деятельности увеличивается, и, соответственно, растет глубина волнового перемешивания от июня до октября, где она достигает максимума. К декабрю активность медленно затухает.
6. Глубина ветрового перемешивания в морях в августе достигает 20–25 метровой изобаты, а в ок-

тябре в Восточно-Сибирском море увеличивается до 35 метровой, а в Чукотском море до 40–50 м.

Проведенные исследования свидетельствуют о заметной изменчивости региональных показателей гидрометеорологического режима морей восточной Арктики. Выявленные особенности могут быть использованы при моделировании состояния ветровой деятельности атмосферы, ледяного покрова, ветрового перемешивания, а также при решении практических задач хозяйственного освоения морей восточной Арктики.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме (№ гос. регистрации: АААА-А17-117030110042-2).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование и динамика современного климата Арктики / под ред. Г.В. Алексева. – СПб: Гидрометеоздат, 2004. – 266 с.
2. Арктический ледяной покров становится сезонным? / В.В. Иванов, В.А. Алексеев, Т.А. Алексеева, Н.В. Колдунов, И.А. Репина, А.В. Смирнов // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 4. – С. 50–65.
3. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, А.В. Уразильдеева, Л.П. Бобылев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – Т. 1. – С. 43–63.
4. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на летнее потепление в Арктике / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, Л.П. Бобылев, А.В. Уразильдеева, Н.В. Гнатюк // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 3 (113). – С. 67–77.
5. Гудкович З.М., Захаров В.Ф., Аксенов Е.О., Позднышев С.П. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове // Тр. ААНИИ. – 1997. – Т. 437. – С. 7–17.
6. Шалина Е.В. Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 67–78.
7. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, Е.И. Александров, Н.Е. Иванов, Н.Е. Харланенкова // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2015. – № 1 (103). – С. 32–41.
8. Суркова Г.В., Крылов А.А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 3. – С. 26–36.
9. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 2 (6). – С. 66–79.
10. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа / И.Е. Фролов, З.М. Гудкович, В.П. Карлин, Е.Г. Ковалев, В.М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 1 (75). – С. 149–160.
11. Гурвич И.А., Заболотских Е.В. Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 3. – С. 101–112.
12. Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, В.М. Смоляницкий, К.В. Фильчук // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64. – № 3. – С. 262–269.
13. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А.В. Юлин, М.В. Шаратунова, Е.А. Павлова, В.В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64. – № 3. – С. 229–240.
14. Голубева Е.Н., Платов Г.А., Якшина Д.Ф. Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 81–92.
15. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата / Г.В. Алексеев, Е.И. Александров, Н.И. Глок, Н.Е. Иванов, В.М. Смоляницкий, Н.Е. Харланенкова, А.В. Юлин // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 2. – С. 5–19.
16. Past climate variability and change in the Arctic and at high latitudes. Final report by the U.S. Climate change science program and subcommittee on global change research. SAP 1.2 / R.B. Alley, J. Brigham-Grette, G.H. Miller, L. Polyak, J.W.C. White. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2009. – 257 p.
17. Arctic sea-ice-free season projected to extend into autumn / M. Lebrun, M. Vancoppenolle, G. Madec, F. Massonnet // The Cryosphere. – 2019. – V. 13. – P. 79–96.
18. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. L. Bernstein, P. Bosch, O. Canziani, Zh. Chen, R. Christ, O. Davidson, W. Hare, S. Huq, D. Karoly, V. Kattsov, Z. Kundzewicz, J. Liu, U. Lohmann, M. Manning, T. Matsuno, B. Menne, B. Metz, M. Mirza, N. Nicholls, L. Nurse, R. Pachauri, J. Palutikof, M. Parry, D. Qin, N. Ravindranath, A. Reisinger, J. Ren, K. Riahi, C. Rosenzweig, M. Rusticucci, S. Schneider, Y. Sokona, S. Solomon, P. Stott, R. Stouffer, T. Sugiyama, R. Swart, D. Tirpak, C. Vogel, G. Yohe. – Geneva, Switzerland: IPCC, 2008. – 104 p.
19. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent / J.A. Francis, E. Hunter, J. Key, X. Wang // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32. – P. L21501.
20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion // Journal of Climate. – 2006. – V. 19. – P. 210–225.
21. Climatic changes of the upper layer salinity of Arctic ocean / Z.M. Gudkovich, A.Y. Proshutinsky, L.A. Timokhov, A.E. Koltyshev, A.L. Garmanov // World climate research programme (WCRP), Arctic climate system study (ACSYS). Final science conference. – St. Petersburg, 2003. – WCRP-118 (CD), WMO/TD № 1232. – P. 1–3.
22. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? / S. Bony, R. Colman, V. Kattsov, R.P. Allan, C.S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M.M. Holland, W. Ingram, D.A. Randall, B.J. Soden, G. Tselioudis, M.J. Webb // Journal of Climate. – 2006. – V. 19. – № 15. – P. 3445–3482.
23. Remote sensing of sea ice in the Northern sea route: studies and applications / O.M. Johannessen, V. Alexandrov, I.Y. Frolov et al. – Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2007. – 472 p.
24. Liu Z., Schweiger A. Synoptic conditions, clouds, and sea ice melt onset in the Beaufort and Chukchi seasonal ice zone // Journal of Climate. – 2017. – V. 30. – № 17. – P. 6999–7016.
25. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record / G. Peng, M. Steele, A.C. Bliss, W.N. Meier, S. Dickinson // Remote Sensing. – 2018. – V. 10. – P. 1328.

26. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 / R. Kwok, G.F. Cunningham, M. Wensnahan, I. Rigor, H.J. Zwally, D. Yi // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – V. 114. – P. C07005.
27. Towards seasonal Arctic shipping route predictions / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins and J.J. Day // *Environmental Research Letters*. – 2017. – V. 12. – P. 084005.
28. Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. Variability and conjugacy of ice conditions in the system of East Arctic seas (the Laptev, East Siberian and Chukchi Seas) // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2012. – V. 37. – № 7. – P. 468–476.
29. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные / под ред. И.Н. Давидан, Л.И. Лопатухина, В.А. Рожкова. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
30. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1982. – 148 с.
31. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A.J. Geer, L. Haimberger, S.B. Healy, H. Hersbach, E.V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A.P. McNally, B.M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.-N. Thepaut, F. Vitart // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2011. – V. 137 (656). – P. 553–597.
32. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 4.18 // Technical Note 316. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2014. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (дата обращения 22.11.2019)
33. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 5.16 // Technical Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2016. URL: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (дата обращения 22.11.2019)
34. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – 165 с.
35. Никифоров Е.Г. О связи ветрового течения с ветровым волнением // *Известия АН СССР, серия геофизическая*. – 1956. – № 12. – С. 1450–1460.

Поступила: 18.12.2019 г.

Информация об авторах

Плотников В.В., доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук; профессор кафедры экологии и природопользования Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета.

Вражкин А.Н., кандидат технических наук, заведующий отделом долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института.

Мезенцева Л.И., кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института; доцент кафедры судовождения Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета, Россия.

Друзь Н.И., ведущий инженер отдела долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института.

Вакульская Н.М., научный сотрудник лаборатории ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Дубина В.А., кандидат географических наук, заведующий лабораторией ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

UDC 551.467

VARIABILITY OF HYDROMETEOROLOGICAL REGIME OF SEAS OF EAST ARCTIC SECTOR (EAST SIBERIAN, CHUKCHI) IN THE MODERN PERIOD

Vladimir V. Plotnikov^{1,2},
vlad_plot@poi.dvo.ru

Alexander N. Vrazhkin³,
avrazhkin@ferhri.ru

Lyudmila I. Mezentseva^{3,2},
festfu@mail.ru

Natalya I. Druz³,
hydromet@mail.ru

Nadezda M. Vakulskaya¹,
vakulskaya@poi.dvo.ru

Vyacheslav A. Dubina¹,
dubina@poi.dvo.ru

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia

² Far Eastern State Technical Fisheries University,
52b, Lugovaya street, Vladivostok, 690087, Russia

³ Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
24, Fontannaya street, Vladivostok, 690091, Russia.

The relevance of the research. The rich resource base, the large transport and strategic importance of the Arctic Basin and, in particular, the seas of East Arctic, determine the relevance and necessity of researching the hydrometeorological regime variability of the region.

The main aim of the work is the analysis of variability of regional indicators of the hydrometeorological regime (wind regime, ice conditions and the nature of water mixing) in the East Siberian and Chukchi Seas over the last several decades (from 1979 to 2015).

Object of the research is the complex of the most significant indicators determining the nature of the hydrometeorological conditions of the region.

Methods. Methods of multivariate statistics and modeling were used to analyze the hydrometeorological regime variability of the region.

Results. On the basis of all available hydrometeorological information the analysis of the variability of regional indicators of the hydrometeorological regime is carried out. The conducted researches indicate the directional changes in the indicators of the hydrometeorological regime of the seas of East Arctic:

- the nature and intensity of atmospheric circulation over the region (a change of the nature and intensity of the wind regime is noted);
- in the ice cover of the seas (there is an active decrease of the ice cover);
- in the nature and intensity of wave activity (at the expense of the first two indicators, intensification of the wave activity expressed in a significant increase in the area and depth of wave mixing is observed).

In the future, the obtained estimates can be used to implement a number of probabilistic-statistical models of the hydrometeorological state variability, as well as in solving a number of practical problems, the economic development of areas of the seas of East Arctic.

Key words:

Hydrometeorological regime, ice cover, wind mixing, Chukchi and East Siberian Seas, atmospheric circulation.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for basic research (RFBR) in the framework of scientific project No. 18–05–60104.

REFERENCES

1. *Formirovanie i dinamika sovremennogo klimata Arktiki* [Formation and dynamics of the modern Arctic climate]. Ed. by G.V. Alekseev. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2004. 266 p.
2. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alexeeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smimov A.V. Does Arctic Ocean ice cover become seasonal? *Research of the Earth from space*, 2013, no. 4, pp. 50–65. In Rus.
3. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P. Impact of atmospheric heat and moisture transport on Arctic warming in winter. *Fundamental and Applied Climatology*, 2016, vol. 1, pp. 43–63. In Rus.
4. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Urazgildeeva A.V., Gnatuk N.V. Influence of the atmospheric heat and moisture transport on summer warming in the Arctic. *Arctic and Antarctic research*, 2017, no. 3 (113), pp. 67–77. In Rus.
5. Gudkovich Z.M., Zakharov V.F., Aksenov E.O., Pozdnyshev S.P. Vzaimosvyaz sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy v atmosfere, okeane i ledyanom pokrove [Interrelation of modern climatic changes in the atmosphere, ocean and ice cover]. *Trudy AANII*, 1997, vol. 437, pp. 7–17.
6. Shalina E.V. Ice retreat in the seas of the Russian Arctic and increased availability of the Northern sea route from satellite

- passive microwave observations. *Research of the Earth from space*, 2015, no. 4, pp. 67–78. In Rus.
7. Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., Harlanenkova N.E. Arctic climate change under global warming. *Arctic and Antarctic research*, 2015, no. 1 (103), pp. 32–41. In Rus.
 8. Surkova G.V., Krylov A.A. Changes in average and extreme wind speeds in the Arctic at the end of the 21st century. *Arctic and Antarctic*, 2018, no. 3, pp. 26–36. In Rus.
 9. Kattsov V.M., Porfiriev B.N. Klimaticheskie izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushchey sredy i ekonomiki [Climate change in the Arctic: the consequences for the environment and the economy]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2 (6), pp. 66–79.
 10. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf. *Arctic and Antarctic research*, 2007, no. 1 (75), pp. 149–160. In Rus.
 11. Gurvich I.A., Zabolotskikh E.V. Mesoscale polar lows over the Eastern Arctic Sector according to multisensor satellite remote sensing. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 101–112. In Rus.
 12. Alekseev G.V., Radionov V.F., Smolyanitsky V.M., Filchuk K.V. Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic. *Arctic and Antarctic research*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 262–269. In Rus.
 13. Yulin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian Sea. *Arctic and Antarctic research*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 229–240. In Rus.
 14. Golubeva E.N., Platov G.A., Iakshina D.F. Numerical simulations of the current state of waters and sea ice in the Arctic Ocean. *Ice and Snow*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 81–92. In Rus.
 15. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glock N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Arctic sea ice cover in connection with climate change. *Research of the Earth from space*, 2015, no. 2, pp. 5–19. In Rus.
 16. Alley R.B., Brigham-Grette J., Miller G.H., Polyak L., White J.W.C. *Past climate variability and change in the Arctic and at high latitudes. Final report by the U.S. Climate change science program and subcommittee on global change research. SAP 1.2.* Reston, VA, U.S. Geological Survey, 2009. 257 p.
 17. Lebrun M., Vancoppenolle M., Madec G., Massonnet F. Arctic sea-ice-free season projected to extend into autumn. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, pp. 79–96.
 18. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. Bernstein L., Bosch P., Canziani O., Chen Zh., Christ R., Davidson O., Hare W., Huq S., Karoly D., Kattsov V., Kundzewicz Z., Liu J., Lohmann U., Manning M., Matsuno T., Menne B., Metz B., Mirza M., Nicholls N., Nurse L., Pachauri R., Palutikof J., Parry M., Qin D., Ravindranath N., Reisinger A., Ren J., Riahi K., Rosenzweig C., Rusticucci M., Schneider S., Sokona Y., Solomon S., Stott P., Stouffer R., Sugiyama T., Swart R., Tirkak D., Vogel C., Yohe G. Geneva, Switzerland, IPCC, 2008. 104 p.
 19. Francis J.A., Hunter E., Key J., Wang X. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, pp. L21501.
 20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, pp. 210–225.
 21. Gudkovich Z.M., Proshutinsky A.Y., Timokhov L.A., Koltyshv A.E., Garmanov A.L. Climatic changes of the upper layer salinity of Arctic ocean. World climate research programme (WCRP). *Arctic climate system study (ACSYS). Final science conference.* St. Petersburg, 2003, WCRP-118 (CD), WMO/TD № 1232. pp. 1–3.
 22. Bony S., Colman R., Kattsov V.M., Allan R.P., Bretherton C.S., Dufresne J.-L., Hall A., Hallegatte S., Holland M.M., Ingram W., Randall D.A., Soden B.J., Tselioudis G., Webb M.J. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, pp. 3445–3482.
 23. Johannessen O.M., Alexandrov V., Frolov I.Y., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Y.U., Babich N.G. *Remote sensing of sea ice in the Northern sea route: studies and applications.* Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd, 2007. 472 p.
 24. Liu Z., Schweiger A. Synoptic conditions, clouds, and sea ice melt onset in the Beaufort and Chukchi seasonal ice zone. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, no. 17, pp. 6999–7016.
 25. Peng G., Steele M., Bliss A.C., Meier W.N., Dickinson S. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, pp. 1328.
 26. Kwok R., Cunningham G.F., Wenshanan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114, pp. C07005.
 27. Melia N., Haines K., Hawkins E., Day J.J. Towards seasonal Arctic shipping route predictions. *Environmental Research Letters*, 2017, vol. 12, pp. 084005.
 28. Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. Variability and conjugacy of ice conditions in the system of East Arctic seas (the Laptev, East Siberian and Chukchi Seas). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 37, no. 7, pp. 468–476.
 29. *Veter i volny v okeanakh i moryakh. Spravochnye dannye* [The winds and waves at oceans and seas. Reference data]. Eds. I.N. Davidan, L.I. Lopatukhin, V.A. Rozhkov. Leningrad, Transport Publ., 1974. 359 p.
 30. Dobrovolsky A.D., Zalagin B.S. *Morya SSSR* [Seas of USSR]. Moscow, Moscow State University Publ., 1982. 148 p.
 31. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137 (656), pp. 553–597.
 32. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 4.18. Technical Note 316.* NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2014. Available at: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (accessed 22 November 2019).
 33. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 5.16. Technical Note 329.* NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2016. Available at: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (accessed 22 November 2019).
 34. Lopatukhin L.I. *Vetrovoe volnenie* [Wind wave]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2012. 165 p.
 35. Nikiforov E.G. O svyazi vetrovogo techeniya s vetrovym volneniem [On relation between the wind current and wind wave]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: geofizicheskaya*, 1956, no. 12, p. 1450–1460.

Received: 18 December 2019.

Information about the authors

Vladimir V. Plotnikov, Dr. Sc., chief researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute; professor, Far Eastern State Technical Fisheries University.

Alexander N. Vrazhkin, Cand. Sc., head of the department, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute.

Lyudmila I. Mezentseva, Cand. Sc., senior scientist, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute; associate professor, Far Eastern State Technical Fisheries University.

Natalya I. Druz, leading engineer, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute.

Nadezda M. Vakulskaya, scientist, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute.

Vyacheslav A. Dubina, Cand. Sc., head of the laboratory, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute.