

Климатические колебания как главный фактор изменчивости
условий среды обитания промысловых биоресурсов
и функционирования морских экосистем

УДК 551.46 (268.45)

Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека

А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, В.А. Ившин

Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии
им. Н.М. Книповича (ФГБНУ «ПИНРО»), г. Мурманск

E-mail: trofimov@pinro.ru

Баренцево море, являясь переходной областью между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном, играет крайне важную роль в водообмене между ними. Атлантические воды проникают в Арктический бассейн через Баренцево море и пролив Фрама. Изменения объёмного переноса атлантических вод, их температуры и солёности оказывают влияние на океанографические условия не только Баренцева моря, но и Северного Ледовитого океана в целом, и связаны с крупномасштабными процессами в атмосфере. В данной работе проанализированы метеорологические и океанографические условия Баренцева моря за последние полвека. Предпринята попытка сформулировать интегральные индексы для характеристики термохалинных условий Баренцева моря в целом. На их основе с 1965 г. выделены крупные периоды с различными термическими (тёплые/холодные) и халинными (распреснённые/солёные) условиями. Устойчивый тёплый период в Баренцевом море наблюдается с 2000 г. С 2005 г. воды моря были самыми тёплыми и самыми солёными за весь рассматриваемый период. 2016 г. в целом по морю характеризовался как рекордно тёплый.

Ключевые слова: Баренцево море, изменения климата, климатический индекс, халинный индекс.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море — это шельфовое окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное между Северной Европой и архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (рис. 1). Его климат характеризуется неоднородностью, которая определяется пространственными особенностями взаимодействия тёплых и холодных вод, уровнем солнечной радиации, поступающей на водную поверхность, условиями взаимодействия океана и атмосферы, степенью влияния суши и некоторыми другими факторами [Бойцов, 2006].

Поскольку Баренцево море является переходной областью между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном, оно играет важную роль в водообмене между ними. Изменения объёмного переноса, температуры и солёности атлантических вод, поступающих в Баренцево море, оказывают воздействие как на его океанографические условия, так и на гидрометеорологические условия Северного Ледовитого океана [Voitsov et al., 2012; González-Pola et al., 2018]. В Баренцевом море в районе взаимодействия тёплых атлантических и холодных арктических вод обнаруживается экстремаль-



Рис. 1. Основные потоки атлантических вод в Баренцевом море [по Voitsov et al., 2012]

ная межгодовая изменчивость температуры воды и ледовитости, циркуляции вод и конфигурации фронтальных зон — сравнимая, а в ряде случаев и превосходящая по величине сезонные вариации океанических процессов [Воды Баренцева моря ..., 2016].

Баренцево море отличается высокой биопродуктивностью и богато различными видами промысловых гидробионтов во многом благодаря своему географическому положению (между арктической и бореальной океаническими системами). Океанографические условия Баренцева моря играют важную роль в формировании условий нагула гидробионтов, их зимовки, нереста и сезонных миграций и в результате урожайности поколений и промысловых запасов [Трофимов, 2003; The Barents Sea ..., 2011; Манушин и др., 2014].

В начале 1990-х гг. в Баренцевом море началось повышение температуры воздушных и водных масс и уменьшение ледовитости. Эти три параметра являются основными индикаторами динамики климата морей высоких широт [Voitsov et al., 2012]. Современное потепление, как и в 30–50-е гг. прошлого века, было вызвано усилением переноса тёплого атлантического воздуха из Северо-Восточной

Атлантики и увеличением адвекции вод системой Гольфстрима и Северо-Атлантического течения [Карсаков, 2007, 2009]. В 2000-х и 2010-х гг. среднегодовая температура в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» (70°30′–72°30′ с. ш., 33°30′ в. д.) во все годы превышала среднемноголетнее значение [Voitsov et al., 2012; González-Pola et al., 2018]. При этом 2006, 2007, 2012, 2013, 2015 и 2016 гг. были аномально тёплыми, а в 2012 г. был зарегистрирован исторический максимум среднегодовой температуры на разрезе — она на 1,3 °С превысила среднемноголетнее (1951–2010 гг.) значение. При этом в отдельные месяцы 2006, 2012, 2015 и 2016 гг. наблюдались рекордно высокие значения температуры воды.

Наиболее показательным индикатором климата морской части Арктики являются её ледовые условия [Воды Баренцева моря ..., 2016; Ozhigin et al., 2011]. Анализ данных спутниковых наблюдений за ледовой обстановкой Северного Ледовитого океана и его морей показал, что с начала 80-х гг. прошлого столетия наметилась тенденция на уменьшение площади льдов. За последние 30 лет льда в Баренцевом море стало вдвое меньше — площадь льдов

сократилась на 360 тыс. км². Наиболее быстро она стала сокращаться после 2003 г. [Boitsov et al., 2012].

Учитывая влияние изменений климата Баренцева моря на функционирование его экосистемы и их связь с изменениями климата Северного Ледовитого океана, а также принимая во внимание современное продолжающееся потепление Арктики, целью данной работы стало рассмотрение закономерностей и особенностей изменения климата и его основных индикаторов в Баренцевом море за последние полвека.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для анализа климатической системы Баренцева моря были выбраны следующие метеорологические и океанографические ряды:

— NAO — зимний (декабрь-март) индекс Северо-Атлантического колебания за 1899–2017 гг. [The Climate Data Guide ..., 2018];

— TaW и TaE — среднегодовая температура воздуха (°C), осредненная над западной (70–76° с. ш. 15–35° в. д.) и восточной (69–77° с. ш. 35–55° в. д.) частями Баренцева моря, за 1948–2017 гг. [Monthly mean time series ..., 2018];

— Storms — штормовая активность (количество дней с ветром более 15 м/с в целом за год) в центральной части Баренцева моря (68–80° с. ш. 30–40° в. д.) за 1981–2017 гг. (данные предоставлены ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» на возмездной основе);

— WDFxSW, WDFxE — среднегодовые широтные (ориентированные с запада на восток) дрейфовые расходы воды (Cв, 1 Cв = 10⁶ м³/с) в юго-западной (через разрез вдоль 27° в. д., 71–75° с. ш.) и восточной (через разрез вдоль 48° в. д., 73–77° с. ш.) частях Баренцева моря за 1960–2017 гг., рассчитанные на основе гидродинамической модели [Трофимов, 2000];

— WDFySW, WDFyE — среднегодовые меридиональные (ориентированные с юга на север) дрейфовые расходы воды (Cв, 1 Cв = 10⁶ м³/с) в юго-западной (через разрез вдоль 73° с. ш., 20–34° в. д.) и восточной (через разрез вдоль 75° с. ш., 40–56° в. д.) частях Баренцева моря за 1960–2017 гг., рассчитанные

на основе гидродинамической модели [Трофимов, 2000];

— IceBS — среднегодовая ледовитость (%) Баренцева моря за 1951–2017 гг. [Состояние биологических сырьевых ..., 2018];

— IceAO — среднегодовая ледовитость (10⁶ км²) Арктики за 1979–2017 гг. [Sea Ice Index, 2018];

— SSTSW и SSTSE — среднегодовая температура поверхностного слоя моря (°C), осреднённая для юго-западной (71–74° с. ш. 20–40° в. д.) и юго-восточной (69–73° с. ш. 42–55° в. д.) частей Баренцева моря, за 1982–2017 гг. [SST fields ..., 2018];

— TwKS и SwKS — среднегодовые температура (°C) и солёность воды в верхнем 200-метровом слое в центральной части (70°30′–72°30′ с. ш.) разреза «Кольский меридиан» (вдоль 33°30′ в. д.) за 1951–2017 гг. [ICES Report ..., 2018];

— AAT и AAS — осреднённые по площади (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) температура (°C) и солёность воды на горизонтах 50, 100 м и у дна, а также в слоях 50–100 и 50–200 м в августе-сентябре 1965–2017 гг. (исходные данные по температуре и солёности воды взяты из океанографической базы данных ФГБНУ «ПИНРО»);

— площади (10³ км²), занятые водами с разной температурой и солёностью в слое 50–100 м и у дна в Баренцевом море (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) в августе-сентябре 1965–2017 гг.: AreaAgW — арктические воды (T < 0 °C) в слое 50–100 м, AreaMW — смешанные воды (0 °C < T < 3 °C) в слое 50–100 м, AreaAW — атлантические воды (T > 3 °C) в слое 50–100 м, AreaCBW — холодные придонные воды (T < 0 °C), AreaMBW — смешанные придонные воды (0 °C < T < 1 °C), AreaWBW — тёплые придонные воды (T > 1 °C), AreaFW — распреснённые воды (S < 34,7) в слое 50–100 м, AreaMSW — воды с солёностью от 34,7 до 34,9 в слое 50–100 м, AreaSW — солёные воды (S > 34,9) в слое 50–100 м, AreaFBW — распреснённые воды (S < 34,9) у дна, AreaMSBW — воды с солёностью от 34,9 до 35,0 у дна, AreaSBW — солёные воды (S > 35,0) у дна (расчёты площадей выполнены на основе данных по температуре

и солёности воды, взятых из океанографической базы данных ФГБНУ «ПИНРО»).

Всего было выбрано 36 переменных. Для дальнейшего анализа использовались их нормированные аномалии. Аномалии рассчитывались на основе среднееголетних значений за период с 1981 по 2010 гг. Нормирование аномалий выполнялось с помощью стандартного отклонения.

В работе использовались сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и компонентный анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004; Коросов, Горбач, 2016]. Статистическая обработка данных выполнялась в программах StatGraphics Centurion XVI и MS Excel 2013, графики строились с помощью MS Excel 2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После предварительного сравнительного и корреляционного анализа выбранных ря-

дов, а также принимая во внимание их разную длину, исходный набор данных был сокращён.

В окончательный набор данных были включены 20 переменных за период с 1965 по 2017 гг.:

— зимний (декабрь-март) индекс Северо-Атлантического колебания (NAO);

— среднегодовая температура воздуха, осреднённая над западной (70–76° с. ш. 15–35° в. д.) и восточной (69–77° с. ш. 35–55° в. д.) частями Баренцева моря (TaW, TaE);

— среднегодовые широтные и меридиональные дрейфовые расходы воды в юго-западной и восточной частях Баренцева моря (WDFxSW, WDFxE, WDFySW, WDFyE);

— среднегодовая ледовитость Баренцева моря (IceBS);

— среднегодовые температура и солёность воды в верхнем 200-метровом слое в центральной части (70°30'–72°30' с. ш.) разреза «Кольский меридиан» (вдоль 33°30' в. д.) (TwKS, SwKS);

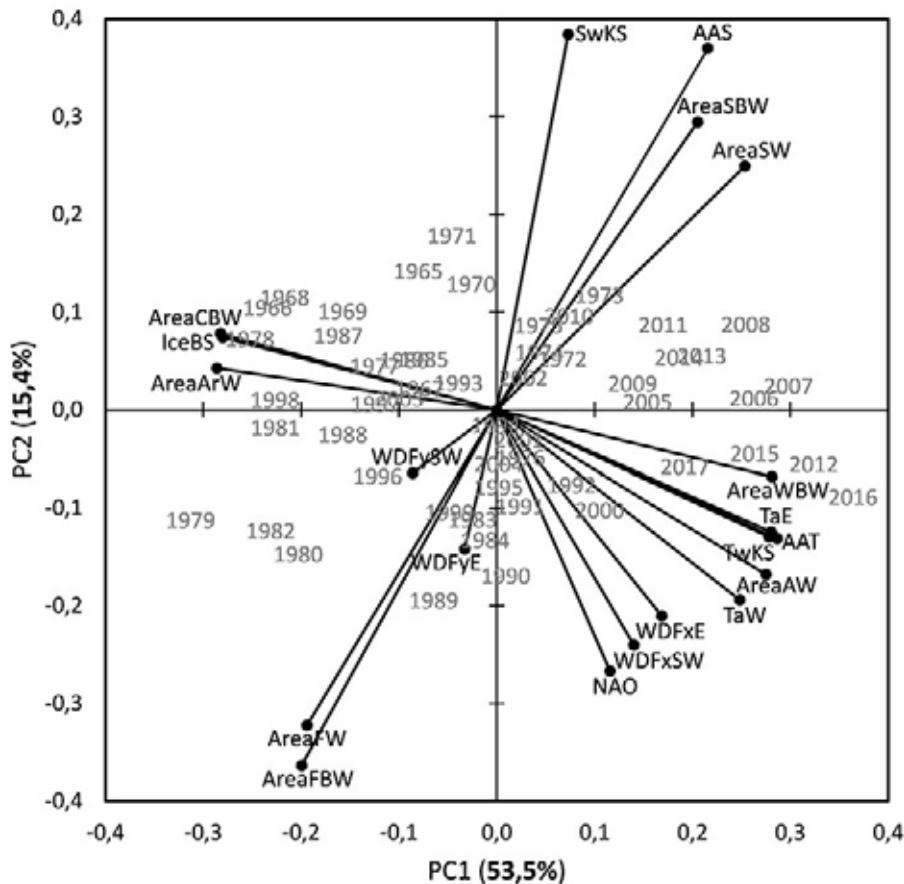


Рис. 2. Распределение метеорологических и океанографических переменных за 1965–2017 гг. в координатах первой и второй главных компонент (PC1 и PC2, соответственно)

— осреднённые по площади (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) температура и солёность воды на 100 м в августе-сентябре (AAT, AAS);

— площади, занятые водами с разной температурой и солёностью в Баренцевом море (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) в августе-сентябре: AreaArW, AreaAW, AreaCBW, AreaWBW, AreaFW, AreaSW, AreaFBW, AreaSBW.

Вначале рассмотрим средние по площади величины температуры и солёности воды. Эти переменные представляют особый интерес, поскольку могут быть использованы в качестве интегральных параметров, отражающих термохалинные условия Баренцева моря в целом. В исходный набор данных были включены средние по площади температура и солёность, рассчитанные для трёх горизонтов (50, 100 м, придонный) и двух слоёв (50–100 и 50–200 м). Эти ряды оказались очень хорошо коррелируемыми между собой: коэффициент корреляции для температуры составил 0,92–0,99, для солёности — 0,82–0,99. Наилучшая корреляция была отмечена между рядами для горизонта 100 м и слоёв 50–100, 50–200 м: коэффициент корреляции составил 0,99 (практически функциональная связь) для температуры и 0,94–0,99 для солёности. Основываясь на этих результатах, для дальнейшего анализа были выбраны температура и солёность на 100 м, как наиболее характерные из всего набора средних по площади переменных.

На рис. 2 и в табл. 1 представлены результаты компонентного анализа выбранных переменных. Относительные веса (процент объясняемой дисперсии всех переменных) первых трёх главных компонент составили 53,5, 15,4 и 8,9% соответственно. Видно, что первая главная компонента (PC1) отвечает за термические переменные (температура воды и воздуха, площади, занятые тёплыми и холодными водами, ледовитость). Температура воды и воздуха, а также площади, занятые тёплыми водами, имеют прямую связь между собой и обратную — с ледовитостью и площадями, занятыми холодными водами. Вторая главная компонента (PC2) отвечает за халинные переменные (солёность воды и площади, занятые солёными и распреснёнными водами) и частично за динамические переменные (зим-

ний индекс Северо-Атлантического колебания и дрейфовые расходы воды). Солёность воды и площади, занятые солёными водами, имеют прямую связь между собой и обратную — с динамическими переменными и площадями, занятыми распреснёнными водами. Однако, как видно из табл. 1, дрейфовые расходы воды лучше связаны с третьей главной компонентой (PC3), чем со второй, их факторные нагрузки в третьей главной компоненте наибольшие (0,25–0,58).

1966, 1968, 1969, 1978, 1979, 1981, 1982, 1987 и 1998 гг., занимающие на рис. 2 крайнее левое положение, были аномально холодными и характеризовались большой ледовитостью и большими площадями холодных вод, а также низкими температурами воды и воздуха и малыми площадями тёплых вод. 2006, 2007, 2012, 2013, 2015, 2016 и 2017 гг., занимающие на графике крайнее правое поло-

Таблица 1. Факторные нагрузки метеорологических и океанографических переменных для первых трёх главных компонент (PC1, PC2 и PC3).

| Переменная | Главная компонента | | |
|------------|--------------------|-------|-------|
| | PC1 | PC2 | PC3 |
| AAT | 0,29 | –0,13 | –0,07 |
| TwKS | 0,28 | –0,13 | –0,03 |
| AreaAW | 0,28 | –0,17 | –0,08 |
| AreaWBW | 0,28 | –0,07 | 0,00 |
| TaE | 0,28 | –0,12 | –0,03 |
| TaW | 0,25 | –0,19 | 0,17 |
| AreaArW | –0,29 | 0,04 | 0,11 |
| AreaCBW | –0,28 | 0,08 | 0,07 |
| IceBS | –0,28 | 0,07 | 0,03 |
| SwKS | 0,07 | 0,38 | 0,32 |
| AAS | 0,22 | 0,37 | 0,09 |
| AreaSBW | 0,21 | 0,29 | 0,01 |
| AreaSW | 0,25 | 0,25 | 0,08 |
| AreaFBW | –0,20 | –0,36 | 0,01 |
| AreaFW | –0,19 | –0,32 | –0,05 |
| NAO | 0,12 | –0,27 | –0,17 |
| WDFxSW | 0,14 | –0,24 | 0,25 |
| WDFxE | 0,17 | –0,21 | 0,34 |
| WDFySW | –0,09 | –0,06 | 0,58 |
| WDFyE | –0,03 | –0,14 | 0,53 |

жение, были, напротив, аномально тёплыми и характеризовались высокими температурами воды и воздуха, большими площадями тёплых вод, а также малой ледовитостью и малыми площадями холодных вод. 1979, 1980, 1982, 1989 и 1996 гг. были аномально распресснёнными, тогда как 1965, 1970, 1973–1975, 2006–2008, 2011–2016 гг. были аномально солёными. Некоторые годы, такие как 1971, 1980 и 2008, хоть и занимали крайнее правое (левое) или верхнее (нижнее) положения на рис. 2, но к аномально тёплым (холодным) или солёным (распресснённым) не относились (как будет показано далее).

На рис. 3 представлены нормированные аномалии выбранных переменных, отсортированные по корреляции с использованием первой главной компоненты. Здесь в течение последних 40 лет отчётливо прослеживается тренд на потепление. Период с 2005 г. характеризуется самыми высокими температурами и наибольшими площадями, занятыми тёплыми и солёными водами, а также низкой ледовитостью и наименьшими площадями, занятыми холодными и распресснёнными водами.

В соответствии с результатами компонентного анализа в проанализированном наборе данных были выделены две группы переменных: термические и халинные. В группу термических переменных вошли температура воздуха в западной и восточной частях Баренцева моря, температура воды на разрезе «Кольский меридиан», средняя по площади температура воды на 100 м, площади, занятые тёплыми

и холодными водами в слое 50–100 м и у дна, ледовитость. В группу халинных переменных были включены солёность воды на разрезе «Кольский меридиан», средняя по площади солёность воды на 100 м, площади, занятые солёными и распресснёнными водами в слое 50–100 м и у дна. На их основе была предпринята попытка поиска интегральных параметров, а именно: термического (или, другими словами, климатического) и халинного индексов, позволяющих оценивать термохалинные условия Баренцева моря в целом.

Вначале рассмотрим термические переменные. Результаты их компонентного анализа представлены на рис. 4. Известно, что ледовитость, температура воздуха и воды являются индикаторами морского климата [Voitsov et al., 2012]. Поэтому для расчёта климатического индекса Баренцева моря в этой работе использовались именно эти три ключевые составляющие. Учитывая представленные выше результаты компонентного анализа (см. рис. 4), в качестве первой составляющей климатического индекса была выбрана среднегодовая ледовитость Баренцева моря (здесь площадь моря, свободная ото льда), в качестве второй составляющей — среднее значение среднегодовых величин температуры воздуха в западной и восточной частях моря, и в качестве третьей составляющей — средняя по площади температура воды на 100 м в августе-сентябре. Здесь средняя по площади температура воды на 100 м была выбрана в качестве характерного представителя всех переменных, описывающих терми-

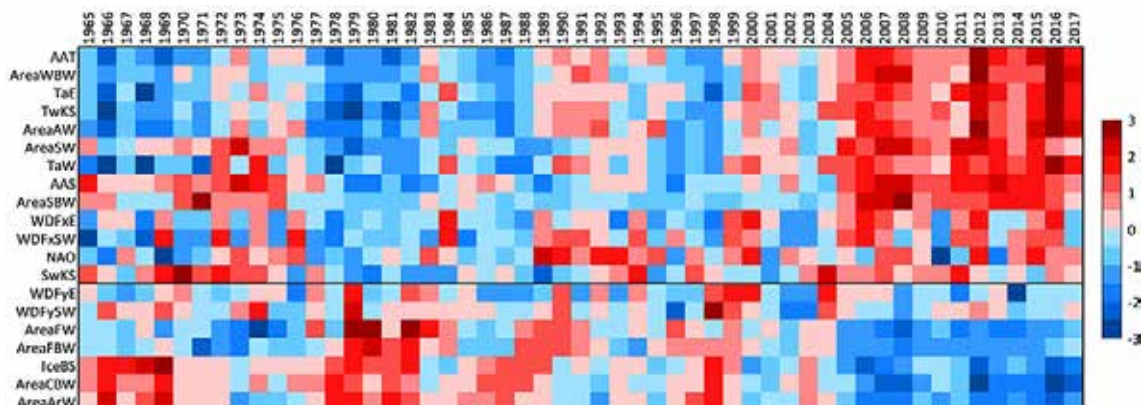


Рис. 3. Нормированные аномалии метеорологических и океанографических переменных за 1965–2017 гг. (отсортированные по первой главной компоненте)

ческие условия вод Баренцева моря (температура на разрезе «Кольский меридиан», площади, занятые тёплыми и холодными водами в слое 50–100 м и у дна), потому что она очень хорошо коррелирует не только с каждой из них по отдельности ($r = 0,91–0,97$), но и с их средним значением ($r = 0,98$ — в случае, когда среднее значение рассчитано без учёта средней по площади температуры, $r = 0,99$ — в случае, когда среднее значение рассчитано с учётом средней по площади температуры). Поэтому средняя по площади температура на 100 м была использована для расчёта климатического индекса вместо среднего значения всех переменных, описывающих термическое состояние вод. В результате климатический индекс Баренцева моря был рассчитан как среднее значение нормированных аномалий трёх переменных, выбранных в качестве его составляющих (рис. 5).

Анализ межгодовой изменчивости климатического индекса и его кумулятивной кривой показал наличие двух больших климатических периодов: холодного — с 1965 по 1989 гг. и тёплого — с 1990 по 2017 гг. (см. рис. 5).

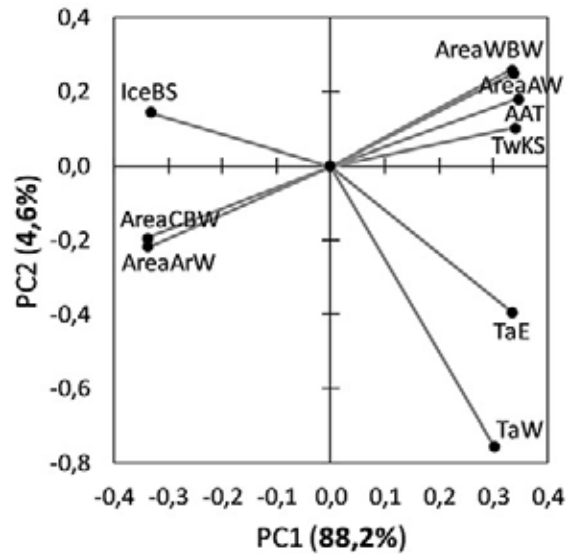


Рис. 4. Распределение термических переменных в координатах первой и второй главных компонент (PC1 и PC2, соответственно)

Для детальной оценки термических условий Баренцева моря в отдельные годы была выполнена классификация лет как по климатическому индексу, так и по каждой из трёх его со-

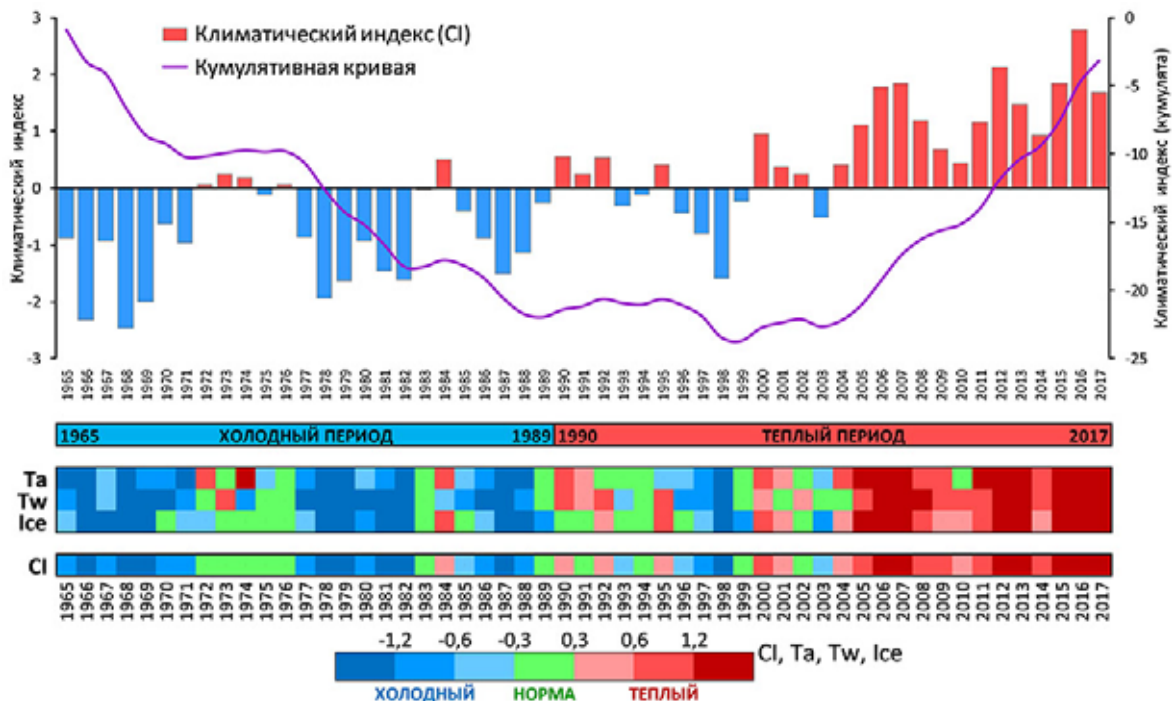


Рис. 5. Климатический индекс (CI) и его кумулятивная кривая за 1965–2017 гг. (сверху), основные климатические периоды (в центре) и классификация лет по климатическому индексу и его отдельным компонентам:

Ta — нормированная аномалия температуры воздуха; Tw — нормированная аномалия температуры воды; Ice — нормированная аномалия свободной ото льда площади моря (внизу)

ставляющих (см. рис. 5). Для классификации было предложено использовать семь градаций: аномально холодный год (нормированная аномалия $(\Delta T/\sigma)$ меньше $-1,2$), холодный год ($-1,2 < \Delta T/\sigma < -0,6$), умеренно холодный год ($-0,6 < \Delta T/\sigma < -0,3$), нормальный год ($-0,3 < \Delta T/\sigma < 0,3$), умеренно тёплый год ($0,3 < \Delta T/\sigma < 0,6$), тёплый год ($0,6 < \Delta T/\sigma < 1,2$), аномально тёплый год ($\Delta T/\sigma > 1,2$). В течение холодного периода наиболее холодные подпериоды становились всё короче и короче и прерывались нормальными и умеренно тёплыми годами. Устойчивый тёплый период в Баренцевом море начался с 2000 г. и был прерван только в 2003 г. (умеренно холодный год). Согласно климатическому индексу, наиболее тёплые годы наблюдались с 2005 г., при этом 2006, 2007, 2012,

2013 и 2015–2017 гг. были аномально тёплыми, а 2016 г. к тому же оказался рекордно тёплым за весь исследованный период с 1965 г. Аномально холодными были 1966, 1968, 1969, 1978, 1979, 1981, 1982, 1987 и 1998 гг.

Теперь перейдём к рассмотрению халинных переменных. Учитывая результаты их компонентного анализа (рис. 6), для расчёта халинного индекса Баренцева моря вначале предполагалось использовать среднегодовую солёность воды на разрезе «Кольский меридиан», среднюю по площади солёность воды на 100 м в августе-сентябре, среднее значение площадей, занятых солёными водами в слое 50–100 м и у дна в августе-сентябре, а также среднее значение площадей, занятых распреснёнными водами в слое 50–100 м и у дна в августе-сентябре. Однако, затем для этих целей была использована только средняя по площади солёность. Она была выбрана в качестве характерного представителя всех перечисленных халинных переменных, поскольку оказалась единственной переменной, имеющей наилучшую корреляцию со всеми остальными (табл. 2). Также средняя по площади солёность показала очень хорошую связь со средним значением остальных халинных переменных ($r = 0,97$). Таким образом, нормированная аномалия средней по площади солёности воды на 100 м в августе-сентябре была принята в качестве халинного индекса Баренцева моря для оценки халинных условий его вод.

Анализ межгодовой изменчивости халинного индекса (НИ) и его кумулятивной кривой показал наличие трёх больших периодов: двух солёных — с 1965 по 1977 гг. и с 2000 по 2017 гг., и одного распреснённого — с 1978 по 1999 гг. (рис. 7). Для детальной оценки

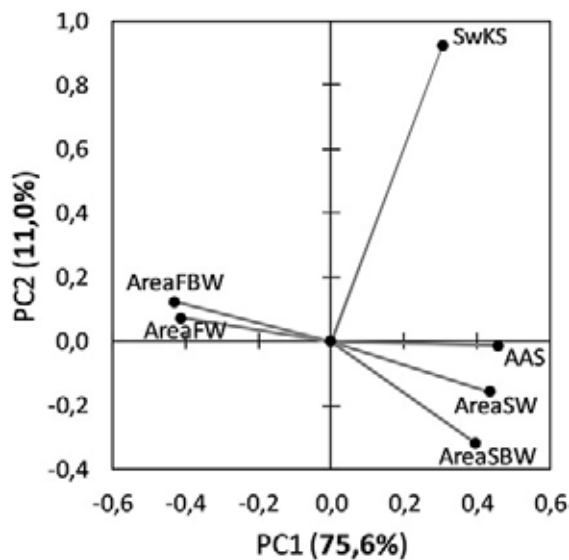


Рис. 6. Распределение халинных переменных в координатах первой и второй главных компонент (PC1 и PC2, соответственно)

Таблица 2. Корреляционная матрица халинных переменных

| Коэффициент корреляции | AAS | SwKS | AreaFW | AreaSW | AreaFBW | AreaSBW |
|------------------------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|
| AAS | | 0,61 | -0,88 | 0,90 | -0,86 | 0,78 |
| SwKS | 0,61 | | -0,49 | 0,50 | -0,52 | 0,41 |
| AreaFW | -0,88 | -0,49 | | -0,76 | 0,77 | -0,63 |
| AreaSW | 0,90 | 0,50 | -0,76 | | -0,83 | 0,76 |
| AreaFBW | -0,86 | -0,52 | 0,77 | -0,83 | | -0,75 |
| AreaSBW | 0,78 | 0,41 | -0,63 | 0,76 | -0,75 | |

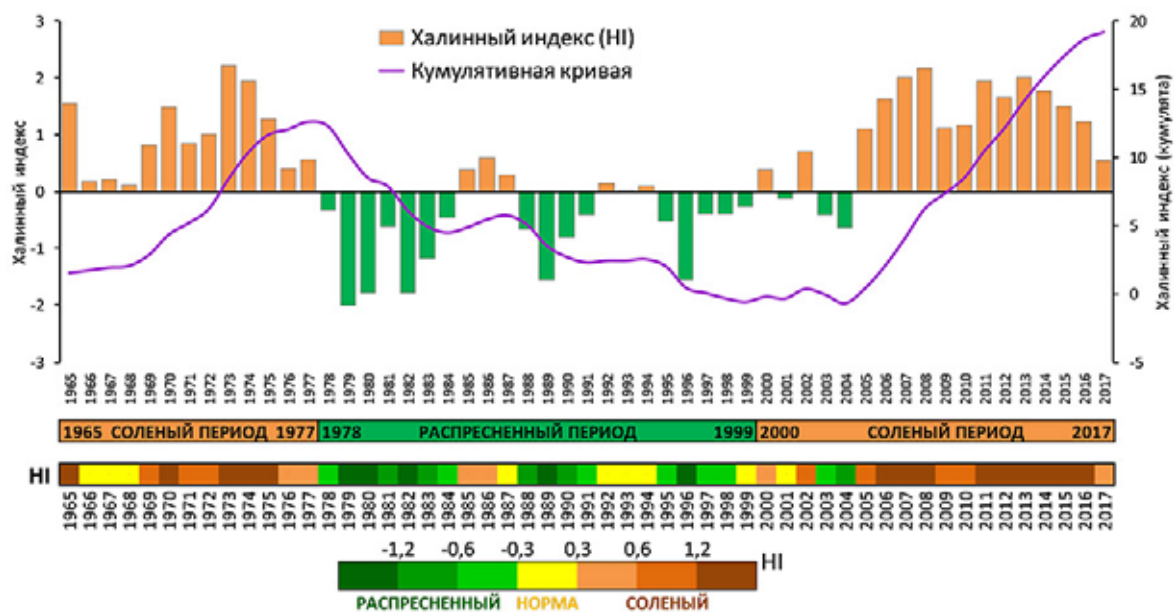


Рис. 7. Халинный индекс (HI) и его кумулятивная кривая за 1965–2017 гг. (сверху), основные халинные периоды (в центре) и классификация лет по халинному индексу (внизу)

халинных условий Баренцева моря в отдельные годы выполнена классификация лет по халинному индексу (см. рис. 7). По аналогии с климатическим индексом для классификации было использовано семь градаций: аномально распрсенный год (халинный индекс мень-

ше $-1,2$), распрсенный год ($-1,2 < HI < -0,6$), умеренно распрсенный год ($-0,6 < HI < -0,3$), нормальный год ($-0,3 < HI < 0,3$), умеренно солёный год ($0,3 < HI < 0,6$), солёный год ($0,6 < HI < 1,2$), аномально солёный год ($HI > 1,2$). Распрсенный период

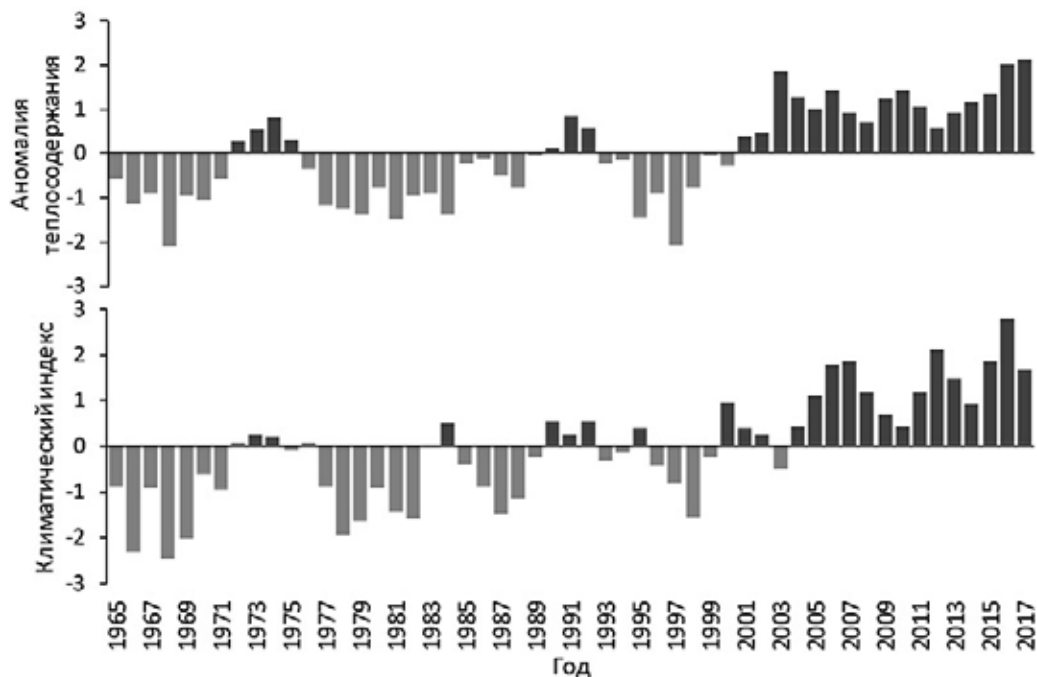


Рис. 8. Нормированные аномалии теплосодержания в Норвежском море (сверху) [ICES Report ..., 2018] и климатический индекс Баренцева моря (снизу) в 1965–2017 гг.

прерывался дважды нормальными и умеренно солёными годами. Аномально распреснёнными были 1979, 1980, 1982, 1989 и 1996 гг. Второй солёный период начался с 2000 г. и был прерван умеренно распреснённым 2003 г. и распреснённым 2004 г. Устойчивый период с высокой солёностью вод в Баренцевом море начался с 2005 г. Аномально солёными были 1965, 1970, 1973–1975, 2006–2008, 2011–2016 гг. С 2013 г. наблюдается устойчивое понижение халинного индекса.

Сравнение содержания тепла и распреснённых вод в Норвежском море с климатическим и халинным индексами Баренцева моря подтверждает, что основная часть изменчивости термохалинных условий Баренцева моря имеет адвективную природу. Изменения теплосодержания в Норвежском море хорошо согласуются с изменениями климатического индекса Баренцева моря; в обоих случаях с 1965 по 2017 г. отмечаются два больших периода: холодный с перерывами и тёплый (рис. 8). Коэффициент корреляции между этими двумя рядами составляет 0,78 при сдвиге 1 год и длине ряда 52 года. Что касается солёности, то содержание распреснённых вод в Норвежском море и халинный индекс Баренцева моря так-

же хорошо согласуются друг с другом; в обоих случаях с 1965 по 2017 гг. выделяются три больших периода: два солёных и один распреснённый (рис. 9). Коэффициент корреляции между этими двумя рядами равен $-0,74$ при сдвиге 1 год и длине ряда 52 года (отрицательный коэффициент корреляции получился, поскольку содержание распреснённых вод является величиной обратной солёности, т. е. халинному индексу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа метеорологических и океанографических условий Баренцева моря введены климатический и халинный индексы, которые могут быть использованы в качестве интегральных параметров для оценки термохалинных условий моря в целом.

На основе полученных индексов в Баренцевом море с 1965 г. выделено два периода с разными термическими условиями (холодный — 1965–1989 гг., тёплый — 1990–2017 гг.) и три периода с разными халинными условиями (солёные — 1965–1977 и 2000–2017 гг., распреснённый — 1978–1999 гг.).

Устойчивый тёплый период в Баренцевом море начался с 2000 г. и прерывался только

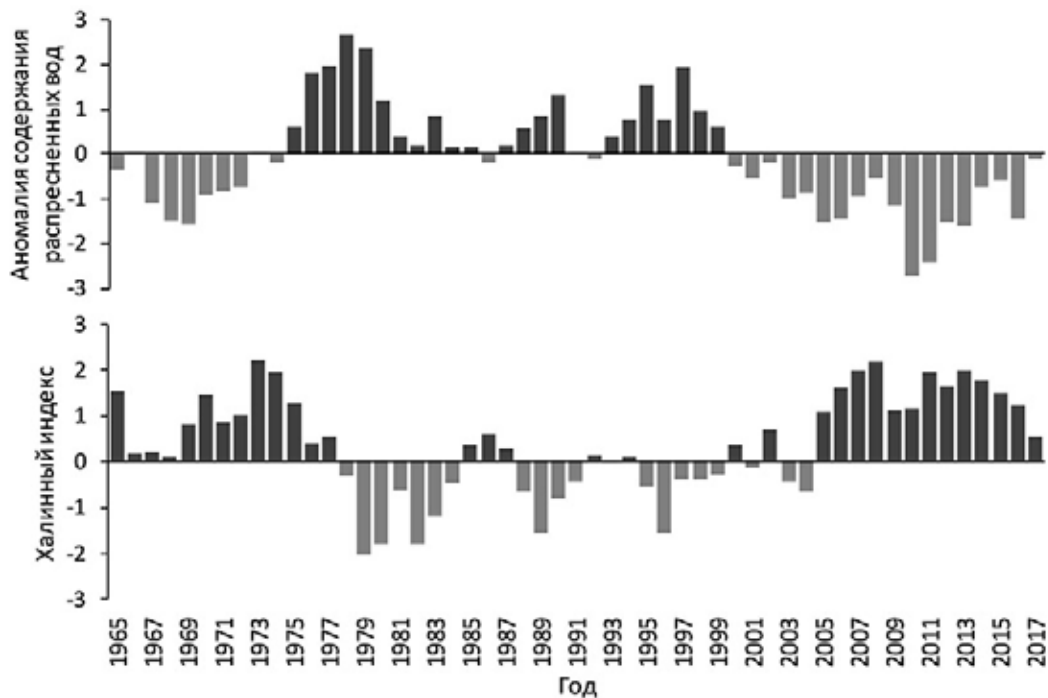


Рис. 9. Нормированные аномалии содержания распреснённых вод в Норвежском море (сверху) [ICES Report ..., 2018] и халинный индекс Баренцева моря (снизу) в 1965–2017 гг.

в 2003 г. (умеренно холодный год). С 2005 г. воды моря были самыми тёплыми и самыми солёными с 1965 г. 2016 г. стал рекордно тёплым — климатический индекс достиг максимально высокого значения за весь рассматриваемый период.

Отмечено, что изменчивость термохалиновых условий Баренцева моря имеет в основном адвективную природу.

ЛИТЕРАТУРА

- Бойцов В.Д. 2006. Изменчивость температуры воды Баренцева моря и её прогнозирование. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 292 с.
- Елисеева И.И., Юзбашев М.М. 2004. Общая теория статистики / Под ред. И.И. Елисеевой. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Карсаков А.Л. 2007. Закономерности и особенности режима вод Баренцева моря (по наблюдениям на вековом разрезе «Кольский меридиан»). Дисс ... канд. геогр. наук. Мурманск: ММБИ. 198 с.
- Карсаков А.Л. 2009. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море в 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 139 с.
- Коросов А.В., Горбач В.В. 2016. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 96 с.
- Манушин И.Е., Анисимова Н.А., Любин П.А., Вязникова В.С., Захаров Д.В. 2014. Изменения в биомассе макрозообентоса в восточной части Баренцева моря за последнее столетие // Мат. XVI науч. семинара «Чтения памяти К.М. Дерюгина» (СПбГУ, 07.12.2013). СПбГУ, Каф. ихтиологии и гидробиологии. СПб. С. 52–59.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Андиферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 260 с.
- Состояние биологических сырьевых ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики на 2018 г. 2018. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 128 с.
- Трофимов А.Г. 2000. Численное моделирование циркуляции вод в Баренцевом море. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 42 с.
- Трофимов А.Г. 2003. Динамика вод Баренцева моря и ее влияние на распределение икры, личинок, 0-группы трески и пикши. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 87 с.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Mar. Sci. 69(5): 833–840.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A., Hughes S.L. (Eds). 2018. ICES Report on Ocean Climate 2016. ICES Cooperative Research Report No. 339. 110 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4069>.
- ICES Report on Ocean Climate (IROC). Accessible via: <http://ocean.ices.dk/iroc/>. 20.04.2018.
- Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset / Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA. Accessible via: <http://nomad2.ncep.noaa.gov>. 20.04.2018.
- Ozhigin V.K., Ingvaldsen R.B., Loeng H., Boitsov V.D., Karsakov A.L. 2011. Introduction to the Barents Sea // The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim, Norway. P 39–76.
- Sea Ice Index. Arctic- and Antarctic-wide changes in sea ice. Accessible via: http://nsidc.org/data/seaice_index/. 20.04.2018.
- SST fields from NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOlv2 monthly / Climate Modeling Branch, National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration. Accessible via: <http://iridl.ldeo.columbia.edu>. 20.04.2018.
- The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. 2011. Edited by T. Jakobsen and V.K. Ozhigin. Trondheim, Norway. 825 pp.
- The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) index (PS-based). Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-ps-based>. 20.04.2018.

Поступила в редакцию 03.08.2018 г.
Принята после рецензии 07.09.2018 г.

Habitat of aquatic biological resources

Climatic factors of variability of environmental conditions of fishery resources and marine ecosystem functioning

Climate changes in the Barents Sea over the last half century

A.G. Trofimov, A.L. Karsakov, V.A. Ivshin

N.M. Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (FSBSI «PINRO»),
Murmansk

The Barents Sea, being a transition area between the North Atlantic and the Arctic Basin, plays a key role in water exchange between them. Atlantic waters enter the Arctic Basin through the Barents Sea and the Fram Strait. Variations in volume flux, temperature and salinity of Atlantic waters affect hydrographic conditions in both the Barents Sea and the Arctic Ocean and are related to large-scale atmospheric pressure systems. In this paper, meteorological and oceanographic conditions of the Barents Sea were analyzed over the last half century. An attempt was made to formulate integral indices for characterizing the thermohaline conditions of the Barents Sea as a whole. Using them, since 1965, large periods with different thermal (warm/cold) and haline (fresh/saline) conditions were found. A stable warm period in the Barents Sea has been observed since 2000. Since 2005, the sea waters have been the warmest and the most saline for the entire considered period. The year of 2016 was characterized as a record warm in the sea as a whole.

Keywords: Barents Sea, climate changes, climate index, haline index.

REFERENCES

- Bojtsov V.D.* 2006. *Izmenchivost' temperatury vody Barentseva morya i ee prognozirovaniye* [Variability of water temperature in the Barents Sea and its forecasting]. Murmansk: Izd-vo PINRO. 292 s.
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M.* 2004. *Obshchaya teoriya statistiki* [General theory of statistics] / Pod red. I.I. Eliseevoy. M.: Finansy i statistika. 656 s.
- Karsakov A.L.* 2007. *Zakonomernosti i osobennosti rezhima vod Barentseva morya (po nablyudeniyyam na vekovom razreze «Kol'skij meridian»)* [Patterns and features of the Barents Sea waters conditions (according to observations along the Kola Section)]. Diss. ... kand. geogr. nauk. Murmansk: MIMBI. 198 s.
- Karsakov A.L.* 2009. *Okeanograficheskie issledovaniya na razreze «Kol'skij meridian» v Barentsevom more v 1900–2008 gg.* [Oceanographic investigations along the Kola Section in the Barents Sea in 1900–2008]. Murmansk: Izd-vo PINRO. 139 s.
- Korosov A.V., Gorbach V.V.* 2016. *Komp'yuternaya obrabotka biologicheskikh dannykh* [Computer processing of biological data]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU. 96 s.
- Manushin I.E., Anisimova N.A., Lyubin P.A., Vyaznikova V.S., Zakharov D.V.* 2014. *Izmeneniya v biomasse makrozoobentosa v vostochnoj chasti Barentseva morya za poslednee stoletie* [Changes in the biomass of macrozoobenthos in the eastern Barents Sea during the last century] // *Mat. XVI nauch. seminara «Chteniya pamyati K.M. Deryugina»* (SPbGU, 07.12.2013) / SPbGU, Kaf. ikhtiologii i gidrobiologii. SPb. S. 52–59.
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M. Yu.* 2016. *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* [The

- Barents Sea waters: structure, circulation, variability]. Murmansk: PINRO. 260 s.
- Sostoyanie biologicheskikh syr'evykh resursov Barentseva morya i Severnoj Atlantiki na 2018 g.* [Status of biological resources in the Barents Sea and North Atlantic for 2018]. 2018. Murmansk: Izd-vo PINRO. 128 s.
- Trofimov A.G. 2000. Chislennoe modelirovanie tsirkulyatsii vod v Barentsevom more [Numerical modelling of water circulation in the Barents Sea]. Murmansk: Izd-vo PINRO. 42 s.
- Trofimov A.G. 2003. Dinamika vod Barentseva morya i ee vliyanie na raspredelenie ikry, lichinok, 0-gruppy treski i pikshi [Water dynamics in the Barents Sea and its influence on the distribution of eggs, larvae, 0-groups of cod and haddock]. Murmansk: Izd-vo PINRO. 87 s.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // *ICES J. of Mar. Sci.* 69(5): 833–840.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A., Hughes S.L. (Eds). 2018. *ICES Report on Ocean Climate 2016*. ICES Cooperative Research Report No. 339. 110 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4069>.
- ICES Report on Ocean Climate (IROC)*. Accessible via: <http://ocean.ices.dk/iroc/>. 20.04.2018.
- Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset / Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA*. Accessible via: <http://nomad2.ncep.noaa.gov>. 20.04.2018.
- Ozhigin V.K., Ingvaldsen R.B., Loeng H., Boitsov V.D., Karsakov A.L. 2011. Introduction to the Barents Sea // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation*. Trondheim, Norway. P 39–76.
- Sea Ice Index. Arctic- and Antarctic-wide changes in sea ice*. Accessible via: http://nsidc.org/data/seaice_index/. 20.04.2018.
- SST fields from NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOlv2 monthly / Climate Modeling Branch, National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration*. Accessible via: <http://iridl.ldeo.columbia.edu>. 20.04.2018
- The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation*. 2011. Edited by T. Jakobsen and V.K. Ozhigin. Trondheim, Norway. 825 pp.
- The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) index (PS-based)*. Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-ps-based>. 20.04.2018.

TABLE CAPTIONS

Table 1. Component weights of meteorological and oceanographic variables for the first three principle components (PC1, PC2 and PC3)

Table 2. Correlation matrix of haline variables

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Main flows of Atlantic waters in the Barents Sea [after Boitsov et al., 2012]

Fig. 2. Distribution of meteorological and oceanographic variables for 1965–2017 in the coordinates of the first and second principle components (PC1 and PC2 respectively)

Fig. 3. Normalized anomalies of meteorological and oceanographic variables for 1965–2017 (sorted by the first principle component)

Fig. 4. Distribution of thermal variables in the coordinates of the first and second principle components (PC1 and PC2 respectively)

Fig. 5. Climate index (CI) and its cumulative curve in 1965–2017 (top), main climatic periods (middle) and classification of years by the climate index and by its three components separately: T_a — normalized anomaly of air temperature, T_w — normalized anomaly of water temperature, Ice — normalized anomaly of ice-free area of the sea (bottom)

Fig. 6. Distribution of haline variables in the coordinates of the first and second principle components (PC1 and PC2 respectively)

Fig. 7. Haline index (HI) and its cumulative curve in 1965–2017 (top), main haline periods (middle) and classification of years by the haline index (bottom)

Fig. 8. Normalized heat content anomalies in the Norwegian Sea (upper) [ICES Report..., 2018] and the climate index of the Barents Sea (lower) in 1965–2017

Fig. 9. Normalized fresh water content anomalies in the Norwegian Sea (upper) [ICES Report..., 2018] and the haline index of the Barents Sea (lower) in 1965–2017