

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

УДК: 551.465.7:639.2.0538

Дальние связи в атмосфере и океане как основа долгосрочного рыбопромыслового прогнозирования

А.С. Кровнин,  И. Котенёв, Н.В. Мордасова, Г.П. Муры́й

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ
«ВНИРО»), г. Москва
E-mail: akrovnin@vniro.ru

Глобальная климатическая система характеризуется существованием так называемых дальних связей (ДС), которые представляют собой статистически значимые синхронные корреляции в удалённых друг от друга районах Земли. В работе приводится обзор и подробная характеристика основных ветвей дальних связей в атмосфере и океане. Показано, что климатический сдвиг во второй половине 1980-х годов, сопровождавшийся усилением североатлантического колебания и смещением его центров на восток, обусловил существенные изменения в положении и интенсивности центров других ветвей атмосферных ДС в североатлантическом, евразийском и западно-тихоокеанском регионах, а также в характере их воздействия на поверхностный слой вод в северных частях Атлантического и Тихого океанов. ДС в атмосфере и океане оказывают существенное влияние на многолетние флуктуации численности пополнения и условия выживания различных промысловых объектов. Выявлена тесная связь условий выживания минтая северной части Охотского моря с изменчивостью интенсивности субарктического океанического круговорота, зависящая, в свою очередь, от фазы системы «северотихоокеанское колебание/осцилляция северотихоокеанских круговоротов». В то же время, изменения численности пополнения минтая у Восточной Камчатки происходят в противофазе с изменениями среднего зимнего индекса арктического колебания. Таким образом, представление о дальних связях в системе «океан-атмосфера», ретроспективный анализ связанных с ними климатических режимов и основанное на этом анализе предвидение ожидаемых изменений климата в том или ином регионе могут стать надёжной основой для средне- и долгосрочного прогнозирования тенденций изменения запасов многих объектов российского промысла.

Ключевые слова: дальние связи в атмосфере и океане, климатический режим, Северная Атлантика, Северная Пацифика, восточно-камчатский минтай, минтай северной части Охотского моря.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших задач промысловой океанологии связана с разработкой научных основ долгосрочного рыбопромыслового прогнозирования. Её решение невозможно без выявления факторов, определяющих урожай-

ность поколений промысловых организмов, и механизмов, посредством которых они действуют на морские экосистемы.

Динамика численности и распределение конкретной популяции промысловых гидробионтов в значительной мере определяются

законами, свойственными ей как совокупности особей данного вида. Однако эти законы действуют на фоне изменений, происходящих в среде обитания, прежде всего, под влиянием изменений климата. Глобальные и региональные климатические колебания представляют собой важнейший фактор, обуславливающий флуктуации численности и биомассы промысловых популяций на масштабах времени от нескольких лет до нескольких десятилетий и даже столетий [Cushing, 1978; 1982].

При изучении пространственной структуры глобальной климатической системы выявляются так называемые дальние связи (ДС), которые представляют собой статистически значимые синхронные корреляции, главным образом, между метеорологическими характеристиками в удалённых друг от друга районах Земли. Дальние пространственно-временные связи были использованы в уравнениях регрессии целым рядом авторов уже в начале XX века [Визе, 1927; Helland-Hansen, Nansen, 1920; Walker, 1928; Walker, Bliss, 1932]. Соответствующий метод получил название «метода мировой погоды». Его практическая реализация позволила обнаружить противофазность в поле приземного атмосферного давления между Исландией и Азорскими островами (североатлантическое колебание), Аляской и Гавайскими островами (северотихоокеанское колебание), Индонезией и юго-восточной частью Тихого океана (южное колебание). Появление в последние десятилетия обширных массивов данных позволило не только уточнить характеристики ранее обнаруженных дальних связей, но и выявить новые [Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987]. Все выявленные атмосферные дальние связи имеют региональный пространственный масштаб с наличием как минимум двух обширных центров действия.

Благодаря взаимодействию океана с атмосферой аномалии океанологических характеристик и, прежде всего, поверхностной температуры воды, распределены в пространстве не случайно, а тесно связаны с крупномасштабными особенностями атмосферной циркуляции, характеризующимися указанными дальними связями. Это подразумевает существование дальних связей и в океане.

Существуют два вида дальних связей. В одном случае, атмосфера и океаны самоорганизуются в когерентные ячейки циркуляции в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. К ним относятся, например, ячейка Гадлея, субтропические струйные течения, муссоны, океаническая термохалинная циркуляция. Любое изменение в интенсивности или положении такой циркуляционной ячейки прослеживается на значительных расстояниях. В другом случае, любые возмущения в указанных циркуляционных ячейках генерируют различного типа волны, которые распространяются в текучей среде, такой как атмосфера или океан, и могут быть достаточно устойчивыми. Эти волны могут, в свою очередь, генерировать региональные климатические аномалии далеко за пределами изначального возмущения.

Дальние связи играют важную роль в глобальной климатической системе, т. к. они отражают взаимодействие между квазистационарной, планетарной циркуляцией в верхних слоях атмосферы и короткопериодными климатическими флуктуациями у поверхности Земли. Они оказывают влияние на температурный режим и режим осадков, положение и интенсивность основных струйных течений, траектории циклонов. Они также ответственны за погодные аномалии, наблюдающиеся одновременно в удалённых друг от друга районах и сохраняющиеся на протяжении значительных периодов.

Касаясь временной структуры колебаний климата, отметим, что определённые особенности проявления дальних связей, как правило, сохраняются на протяжении довольно длительных периодов времени, что приводит к существованию множественных квазистационарных режимов в системе океан-атмосфера. Переход от одного климатического режима к другому происходит довольно быстро, а сами режимы проявляются на различных временных масштабах, в том числе от нескольких лет до нескольких десятилетий [Namias et al., 1982; Trenberth, Hurrell, 1994].

Существование дальних связей в атмосфере и океане дает ключ к пониманию сопряжённости различных биолого-промысловых характеристик в удалённых друг от друга районах океана [Cushing, 1982; Cushing, Dickson, 1976; Kawasaki, Omori, 1988; Lluch-Belda et al.,

1989, 1992; Polovina et al., 1994; Schwartzlose et al., 1999]. В этой связи особое значение имеет книга Г.К. Ижевского «Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб» [1964].

Разработанный Г.К. Ижевским системный подход стал основанием использования для прогностических разработок не только причинно-следственных, но и структурных связей между элементами некоторой сложной системы, проявляющимися лишь в процессе ее функционирования как единого целого. Гипотеза о существовании природных систем оказалась чрезвычайно плодотворной и в том плане, что позволяет использовать эмпирические связи не только в пределах одной системы, но и дальних связей между процессами в соседних и более удалённых системах.

Г.К. Ижевский успешно развил сопряжённую крупномасштабную пространственно-временную изменчивость абиотических и биотических явлений в целях рыбохозяйственного прогнозирования. Он выделил в Северном полушарии природные системы субполушарного масштаба, в которых процессы в гидросфере, атмосфере и биосфере развивались взаимосвязано. Динамика каждой системы в целом и её элементов в отдельности связана качественно и количественно со всеми другими системами Земного шара. По отношению к соседним системам это проявляется в противофазном изменении всех их характеристик. Однако в следующей за соседней системе процессы должны быть согласованы с первой системой [Ижевский, 1964].

Экспериментальная проверка подхода Г.К. Ижевского [Елизаров и др., 1990; Rodionov, 1995; Krovnin, 1995] подтвердила его принципиальное положение о противофазности процессов в Атлантической и Североамериканской системах. Установлена устойчивая отрицательная связь между треской в Северном море и в районах Ньюфаундленда, Лабрадора и Западной Гренландии. А в последних районах выявлена хорошая согласованность в колебаниях пополнения трески.

Ретроспективный анализ климатических режимов в том или ином регионе и связанных с ними долговременных состояний запасов

массовых промысловых объектов, а также учёт дальних биологических связей, могут быть надёжной основой для прогнозирования либо их будущего состояния, либо тренда изменения с учётом знания времени наступления и характера будущего климатического режима.

Основной целью данной работы является характеристика основных ветвей дальних связей в атмосфере и океане и их роль в глобальной климатической системе.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Использованные данные

При исследовании влияния изменений климата на состояние запасов основных промысловых объектов были использованы следующие массивы и временные ряды климатических индексов, а также их источники:

1. По модели NCEP/NCAR: среднемесячные значения геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа, атмосферного давления на уровне моря, глобальных и региональных климатических индексов за период 1950–2018 гг. доступны на сайте Лаборатории Исследования Земных Систем (Earth System Research Laboratory — ESRL, США) по адресам, соответственно, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/> и <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/>.

3. Среднемесячные значения температуры поверхности океана (ТПО) по Расширенной модели Рейнольдса (ERSST v.4; (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v4.html>) и по модели оптимальной интерполяции (OISST v.2; <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>) за период 1950–2018 гг.

Кроме того, в работе использованы данные, характеризующие состояние двух популяций минтая (*Theragra chalcogramma*). Они включали:

— данные о численности поколений точно-камчатского минтая в возрасте 3-х лет за период 1966–2011 гг., предоставленные специалистами ФГБНУ «КамчатНИРО»;

— данные о численности трёхгодовых минтая северной части Охотского моря и биомассе его нерестового запаса для периода 1980–2013 гг., любезно предоставленные

сотрудником ФГБНУ «ВНИРО» Д.А. Васильевым.

Использованные методы

При проведении исследований использованы методы многомерного статистического анализа:

1) Метод главных компонент позволяет выявлять независимые факторы, действующие на набор объектов, в том числе, разнородных по своей природе [Малинин, Гордеева, 2009; Wallace et al., 1990].

2) Метод эмпирических ортогональных функций позволяет выявить ведущие пространственные, а также временные моды в колебаниях поля гидрометеорологического параметра [Bjornsson, Venegas, 1997].

3) Расчёт коэффициентов корреляции между индексами дальних связей и полями аномалий ТПО и геопотенциальных высот поверхности 500 гПа и построение карт их распределения производился в онлайн режиме на странице сайта ESRL с адресом <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>. Предварительно, временные ряды индексов загружались на указанный сайт через анонимный ftp-сервер по адресу: <ftp://ftp.cdc.noaa.gov>.

Основные ветви дальних связей в атмосфере

Основные ветви дальних связей в атмосфере над Северной Атлантикой представлены

североатлантическим колебанием и восточно-атлантической ДС.

Североатлантическое колебание (САК)

представляет собой меридиональную осцилляцию в поле атмосферного давления с двумя центрами действия, один из которых расположен в районе Исландии (Исландский минимум атмосферного давления), а другой — над субтропической частью Северной Атлантики, простираясь от Азорских островов до Пиренейского полуострова (Азорский максимум атмосферного давления) (рис. 1 а). В холодный период года САК является доминирующей модой атмосферной изменчивости в Атлантико-Европейском регионе. Положительная фаза САК характеризуется более глубоким Исландским минимумом и более интенсивным субтропическим антициклоном, которые обуславливают усиление зонального (западного) переноса над акваторией Северной Атлантики. В отрицательную фазу САК его центры слабее обычного, и интенсивность зонального переноса снижается.

САК имеет баротропную структуру и хорошо прослеживается в средней тропосфере (рис. 1 б) и выше. На рис. 1 б хорошо видны два вторичных центра положительных корреляций: над центральной частью США и над восточным побережьем Азии.

На протяжении периода 1950–2018 гг. колебания зимнего (январь-март) индекса САК, рассчитанного как разность нормиро-

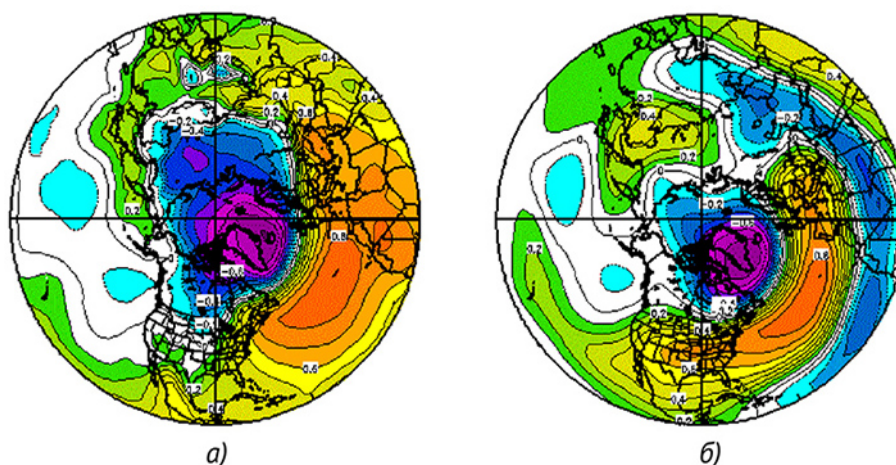


Рис. 1. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (январь-март) индексом САК и полями давления на уровне моря (а) и геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) в Северном полушарии в 1950–2018 гг. Приведённые распределения соответствуют положительной фазе САК

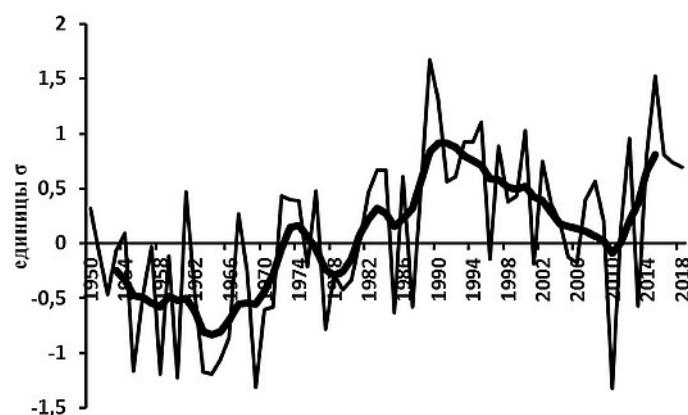


Рис. 2. Изменения зимнего (январь-март) индекса САК в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

ванных аномалий давления на уровне моря между Азорским максимумом и Исландским минимумом, имели ярко выраженный много-летний характер (рис. 2). Индекс сместился к положительной фазе в начале 1970-х годов и достиг максимума в 1989–1994 гг., а затем начал снижаться. После 1970 г., в период развития положительной фазы САК, была четко выражена декадная изменчивость его индекса, а, начиная с 2010 г., значительно усилилась его межгодовая изменчивость, с преобладанием положительных значений.

Рис. 3 демонстрирует корреляционную связь между индексом САК и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в холодный период года, когда тепловое взаимодействие между атмосферой и океаном выражено наиболее сильно. САК оказывает значительное влияние на изменения температурных аномалий в северной части Атлантического океана, обуславливая формирование

трехполюсной структуры — с отрицательными АТПО на северо-западе и юго-востоке её акватории и положительными аномалиями в центральных районах (положительная фаза САК). При отрицательной фазе североатлантического колебания знаки АТПО меняются на противоположные. В северотихоокеанском регионе обнаруживается значимая отрицательная связь индекса САК с изменениями АТПО в заливе Аляска и к северу от Алеутско-мандорской гряды и положительная связь — к югу и востоку от Японских островов.

Наряду с колебаниями интенсивности, система САК обнаруживает также значительные изменения в долготе положения обоих его центров. Анализ данных свидетельствует о ярко выраженном сдвиге Азорского максимума и Исландского минимума атмосферного давления в восточном направлении со второй половины 1970-х годов. Наиболее заметным оно стало в начале 1990-х годов после значи-

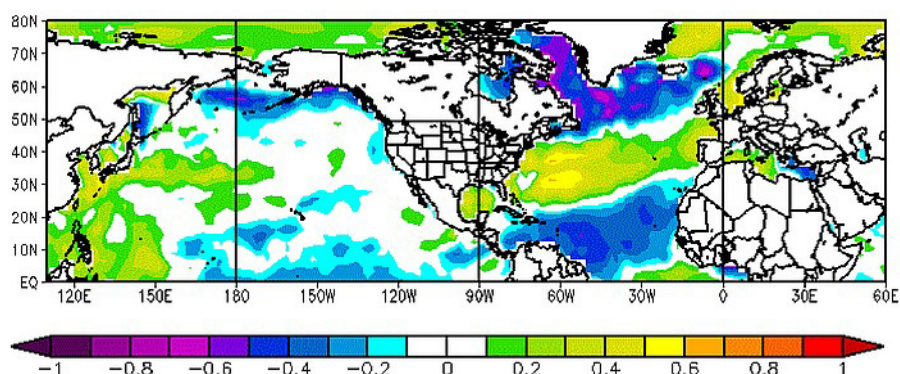


Рис. 3. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом САК и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–2018 гг.

тельного углубления Исландского минимума. С 2006 г. оба центра САК стали смещаться в обратном направлении — на запад. Изменения климата в североатлантическом регионе, связанные с восточным сдвигом центров действия САК подробно описаны в работе [Jung et al., 2003]. Эти изменения определяют также характер взаимодействия между северными частями Атлантического и Тихого океанов.

С североатлантическим колебанием тесно связано **арктическое колебание (АК)** или северная круговая мода [Thompson, Wallace, 1998; 2000]. Коэффициент корреляции между их индексами в зимний период года превышает 0,90. АК характеризуется развитием аномалий давления одного знака над арктическим регионом и аномалиями противоположного знака с центром на $37\text{--}45^\circ$ с. ш. Периоды антициклонического режима атмосферной циркуляции (отрицательная фаза АК) характеризуются повышенным атмосферным давлением в Арктике, пониженными скоростями ветра, низкой температурой воздуха. В такие периоды формируются отрицательные аномалии солёности океанических вод, площадь ледового покрова и толщина морского льда увеличиваются [Thompson, Wallace, 2001]. При развитии циклонического режима циркуляции (положительная фаза АК) возрастает интенсивность выноса морского льда из Северного Ледовитого океана в высокие широты Северной Атлантики и мо-

рей Северо-Европейского бассейна, а дивергенция ветра в летний период года способствует появлению полыней, в которых аккумулируется тепло. Кроме того, в такие периоды усиливается адвекция тёплых воздушных масс в Арктику. Положительная тепловая аномалия обуславливает увеличение продолжительного периода таяния льда и уменьшение толщины ледового покрова [Thompson, Wallace, 2000, 2001].

Восточно-атлантическая дальняя связь (ВА) является второй ведущей модой низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и проявляется во все месяцы года [Barnston, Livezey, 1987]. Пространственная структура ВА схожа со структурой САК и представляет собой меридиональный диполь двух центров аномалий геопотенциальных высот, простирающихся над всей акваторией океана с востока на запад (рис. 4). Центры действия ВА расположены юго-восточнее относительно центров САК. По этой причине эту атмосферную моду часто интерпретируют как «смещённое на юг» САК [Climate Prediction Center — East Atlantic, 2018]. Однако южный центр ВА имеет тесную связь с субтропиками, и его динамика зависит от изменений интенсивности и положения субтропического гребня атмосферного давления. Наличие такой тесной связи с субтропическими широтами отличает ВА от североатлантического колебания.

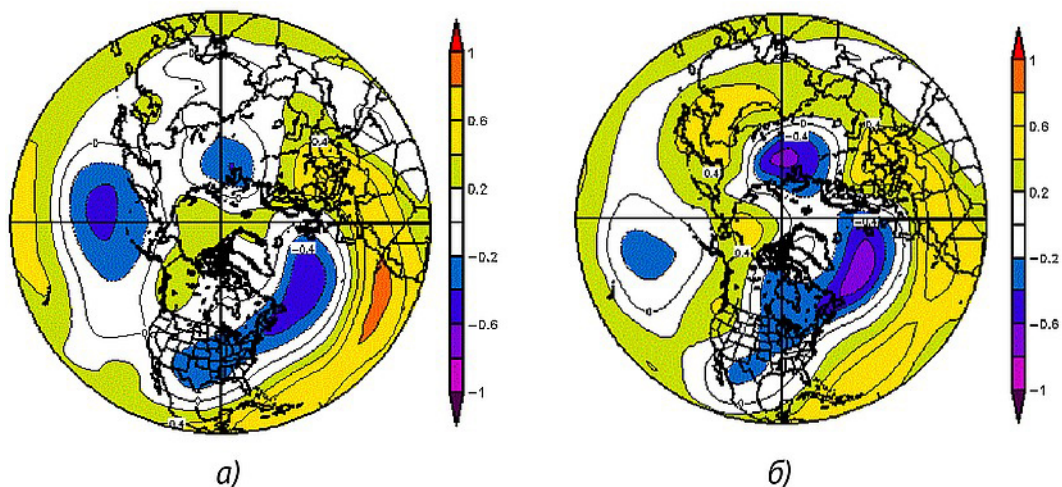


Рис. 4. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (январь–март) индексом ВА и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1951–1987 гг. (а) и 1988–2018 гг. (б)

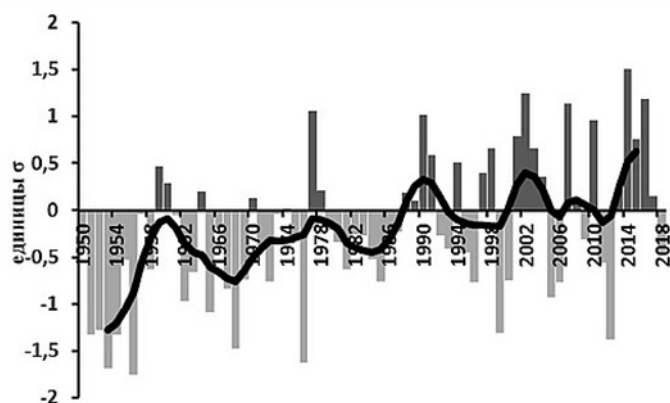


Рис 5. Изменения среднего зимнего (январь-март) индекса ВА в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

Изменения среднего зимнего (январь-март) индекса ВА в 1950–2018 гг. демонстрируют ярко выраженные многодекадные колебания, с довольно резким переходом от отрицательной фазы к положительной в 1988 г. (рис. 5).

Указанный переход сопровождался изменениями в интенсивности и положении центров восточно-атлантической ДС. Судя по более высоким величинам коэффициента корреляции в южном центре ВА в 1950–1987 гг. по сравнению с 1988–2018 гг., можно полагать, что его интенсивность при отрицательной фазе ДС была выше, чем при положительной. В период преобладания отрицательной фазы (1950–1987 гг.) поле корреляций характеризовалось наличием хорошо выраженного диполя над Северной Атлантикой (рис. 4 а). Отмечался также слабо выраженный вторичный центр над северной частью Сибири. С формированием положительной фазы ВА произошло усиление её северного центра и раздвоение субтропического центра (рис. 4 б). Северотихоокеанский диполь значительно ослаб, а сибирский центр, напротив, усилился.

Указанные процессы обусловили изменения в характере влияния ВА на колебания АТПО в северной части Тихого океана. Её отрицательная фаза способствовала усилению тихоокеанской декадной осцилляции (рис. 6 а) (более подробно она будет рассмотрена ниже). В 1987–2018 гг. (положительная фаза) ВА практически не оказывала влияния на термический режим поверхностных вод в данном регионе (рис. 6 б). В Северной Атлантике влияние этой ДС на поверхностные температурные аномалии между двумя периодами существенно не изменилось и проявлялось в формировании меридионального диполя с отрицательными АТПО в районе 40–50° с. ш. и аномалиями противоположного знака в субтропиках.

В атмосфере над **Евразийским сектором Северного полушария** выделены следующие ветви дальних связей: полярно-евразийская ДС, скандинавская ДС и дальняя связь «Восточная Атлантика — Западная Россия» [Barnston, Livezey, 1987].

Полярно-евразийская дальняя связь (ПОЛ/ЕВР) проявляется во все сезоны, но

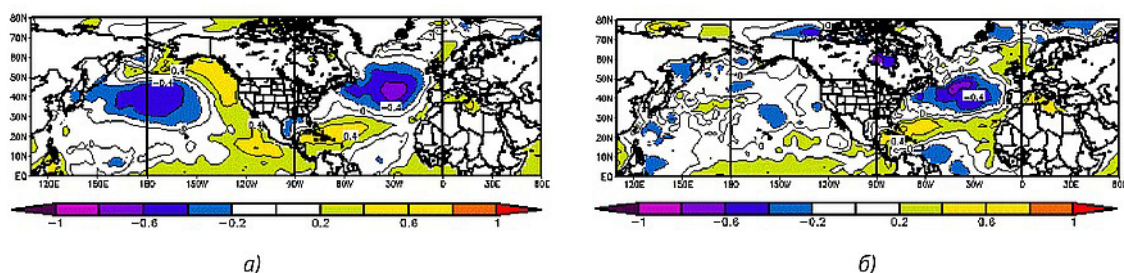


Рис. 6. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ВА и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–1987 гг. (а) и 1988–2018 гг. (б)

наиболее ярко выражена в холодный период года [Climate Prediction Center — Polar/Eurasia, 2018]. Положительная фаза этой ДС включает основной центр отрицательных аномалий геопотенциальных высот над Арктикой и двух центров их положительных аномалий над Европой и Восточной Сибирью — Дальним Востоком. ПОЛ/ЕВР связана с флуктуациями в интенсивности циркумполярного вихря. При этом её положительная фаза отражает его усиление, а отрицательная — ослабление.

Изменения среднего зимнего (декабрь-февраль) индекса ПОЛ/ЕВР в период 1951–2018 гг. демонстрируют ярко выраженные декадные колебания (рис. 7). Эти колебания происходили на фоне общего тренда к снижению значений индекса с переходом к отрицательной фазе в 1999 г., что свидетельствовало о значительном ослаблении циркумполярного

вихря в период до 2015 г. В 2016–2018 г. наметилась тенденция к росту индекса ПОЛ/ЕВР.

Смещение центров САК на восток в конце 1980-х — начале 1990-х годов обусловило изменения в положении и интенсивности центров полярно-евразийской ДС. В 1951–1986 гг. центры этой дальней связи были чётко изолированы друг от друга и занимали сравнительно небольшую площадь (рис. 8а). Европейский центр слабых положительных корреляций был смещён на акваторию Северной Атлантики в район к югу и юго-востоку от Исландии. В 1987–2018 гг. наблюдались значительная интенсификация и увеличение площади всех трёх центров ПОЛ/ЕВР (рис. 8б). Кроме того, усилилась её отрицательная корреляционная связь с экваториально-тропическим поясом, особенно в восточноазиатском секторе

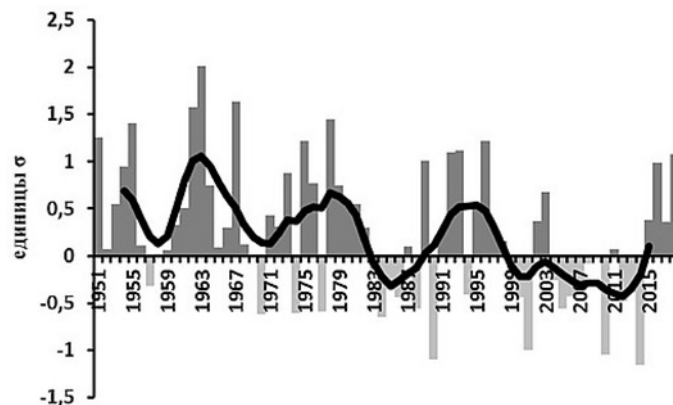


Рис. 7. Изменения среднего зимнего (декабрь-февраль) индекса ПОЛ/ЕВР в 1951–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

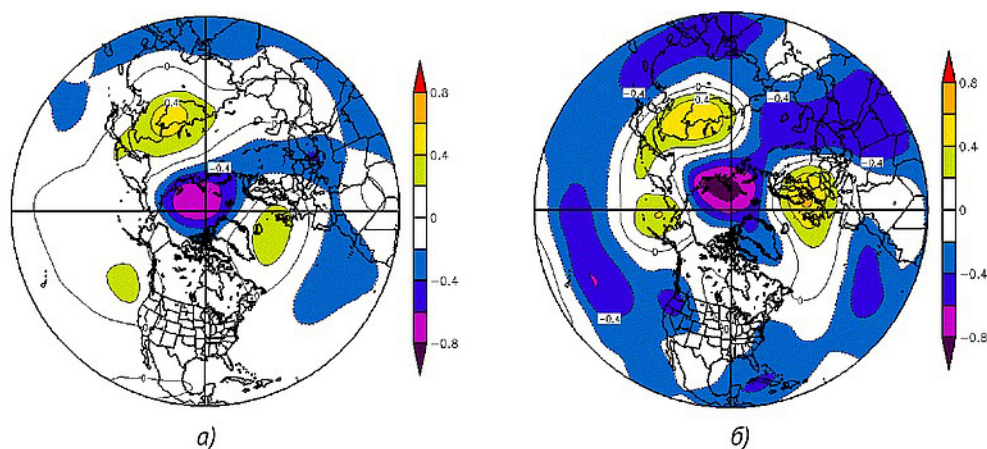


Рис. 8. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (декабрь-февраль) индексом ПОЛ/ЕВР и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1951–1986 гг. (а) и 1987–2018 гг. (б)

и южной части Северной Пацифики, предполагая рост давления в этих районах в периоды развития отрицательной фазы полярно-евразийской ДС и его понижение в годы с её положительной фазой.

Отмеченные процессы проявились и в изменениях связи между индексом этой дальней связи и полем АТПО в холодный сезон года. В период 1951–1986 гг. ПОЛ/ЕВР практически не оказывала существенного влияния на колебания АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике (рис. 9 а). После 1986 г. ситуация значительно изменилась. На акватории Баренцева моря, в центральной и северо-западной частях Северной Атлантики появились районы статистически значимой отрицательной корреляции (рис. 9 б). В экваториальных и тропических широтах юго-западной части Северной Пацифики также усилилась отрицательная корреляционная связь между индексом ПОЛ/ЕВР и АТПО.

Усиление отрицательной связи свидетельствует, что переход рассматриваемой ДС в от-

рицательную фазу в 1999 г. способствовал потеплению вод во всех отмеченных выше районах обоих океанов вплоть до 2015 г.

Скандинавская дальняя связь (СКАНД) проявляется во все сезоны года. Она состоит из трёх центров, расположенных над Финляндией/северо-западной частью России, над западной частью Монголии и над Юго-Западной Европой [Barnston, Livezey, 1987]. Два более слабых центра расположены над Японией и центральными районами Северной Атлантики. Положительная фаза СКАНД связана с присутствием блокирующего антициклона над восточной Скандинавией или северо-западом России, высотных ложбин над Западной Европой и Центральной Азией и высотного атмосферного гребня над Юго-Восточной Азией.

Положительная фаза скандинавской ДС преобладала в 1969–1988 гг. и 2003–2014 гг., а отрицательная — с 1989 по 2002 гг. и в 2015–2018 гг, т. е. в период усиления положительной фазы САК и смещения его центров в восточном направлении (рис. 10).

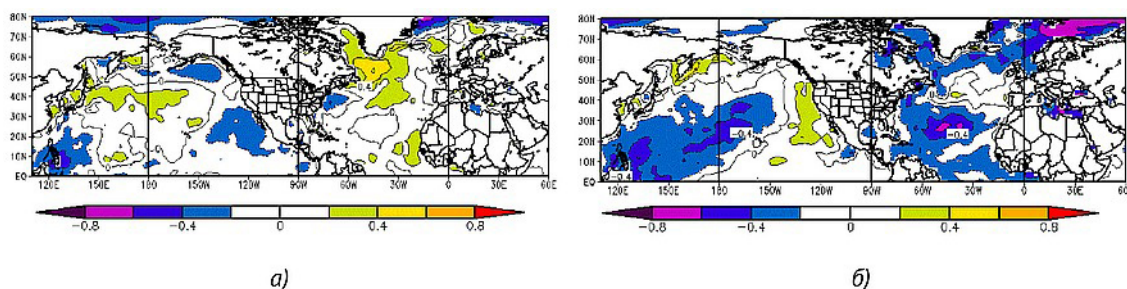


Рис. 9. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ПОЛ/ЕВР и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1951–1986 гг. (а) и 1987–2015 гг. (б)

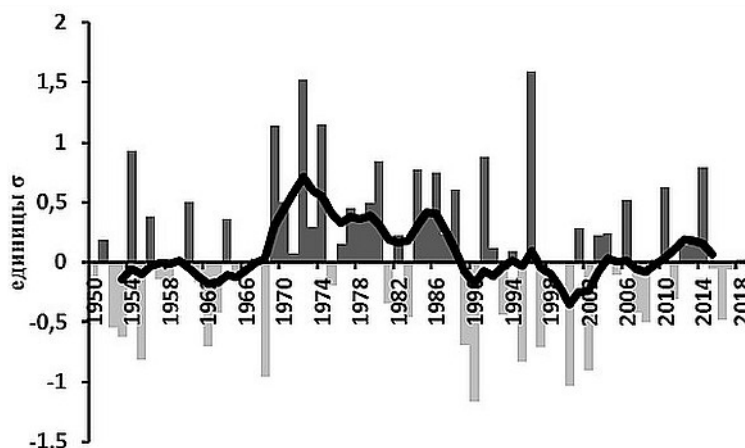


Рис. 10. Изменения среднего зимнего (январь–март) индекса СКАНД в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

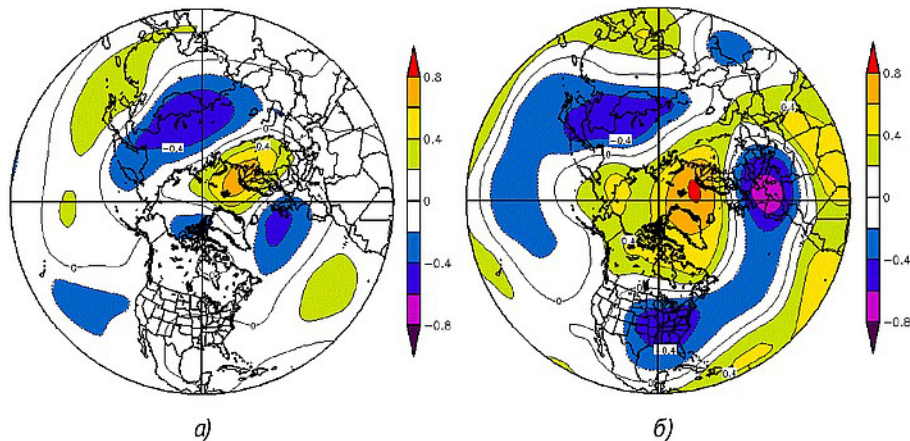


Рис. 11. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом СКАНД и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1950–1986 гг. (а) и 1987–2018 гг. (б)

Как и в случае полярно-евразийской ДС, восточное смещение центров действия САК обусловило значительные изменения в пространственной структуре СКАНД. В 1950–1986 гг. центры этой ДС были хорошо изолированы друг от друга и хорошо согласовывались с распространением планетарных атмосферных волн Россби с чередованием очагов положительных и отрицательных аномалий геопотенциальных высот (рис. 11 а). В 1987–2018 гг. центры СКАНД не только усилились и увеличились в размерах, но и приобрели большую ориентацию в широтном направлении, особенно над океаническими районами (рис. 11 б).

Изменения в пространственной структуре СКАНД между 1987–2018 гг. и 1950–1986 гг. обусловили соответствующие изменения в характере её влияния на АТПО. На протяжении периода 1950–1986 гг. эта ДС не оказывала значительного влияния на колебания температурных аномалий в Северной Атланти-

ке и Северной Пацифике (рис. 12 а). После 1986 г. ситуация изменилась. Прежде всего, значительно усилилась связь между колебаниями индекса СКАНД и АТПО в северитихоокеанском регионе, проявившаяся в возникновении широтного диполя с отрицательными температурными аномалиями (при положительных значениях индекса СКАНД) в центральной части океана и широкой полосы аномалий противоположного знака вдоль западного побережья Северной Америки (рис. 12 б). Область положительных АТПО простиралась из юго-восточной части Северной Пацифики на юго-запад Северной Атлантики. К северу от нее преобладали отрицательные АТПО с центрами к востоку от побережья США и к западу от Пиренейского полуострова.

Следует отметить, что преобладание отрицательной фазы СКАНД в 1989–2002 гг. способствовало потеплению поверхностных вод в обширном районе восточнее Японских островов.

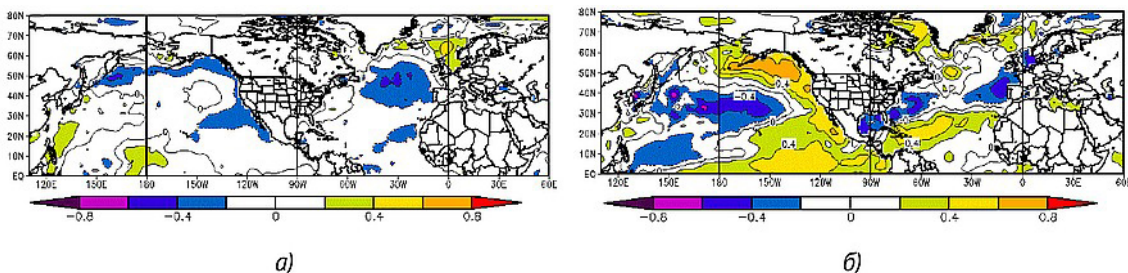


Рис. 12. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом СКАНД и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–1986 гг. (а) и 1987–2018 гг. (б)

Дальняя связь «Восточная Атлантика/Западная Россия» (ВА/ЗР) — одна из трёх хорошо выраженных ветвей дальних связей, которые оказывают влияние на климат Евразии на протяжении всего года. Она включает четыре центра [Barnston, Livezey, 1987]. Положительная фаза ВА/ЗР связана с положительными аномалиями геопотенциальных высот над Западной Европой и Северо-Восточным Китаем и их отрицательными аномалиями, расположенными севернее Каспийского моря и западнее Гренландии.

Многолетние изменения индекса ВА/ЗР свидетельствуют о преобладании её отрицательной фазы в 1970-е — 1980-е гг. и 2008—2016 гг., а положительной — в 1953—1968 и 1989—2007 гг. (рис. 13).

Описанная выше пространственная структура ВА/ЗР была характерна для периода преобладания её отрицательной фазы (рис. 14 а). При преобладании положительной фазы этой ДС наблюдалось усиление всех её центров и формирование двух новых центров — отрицательных аномалий геопотенциальных высот над Мексикой и юго-восточной частью Северной Пацифики и положительных аномалий над северо-востоком США (рис. 14 б).

Различия в пространственной структуре ВА/ЗР между периодами преобладания её отрицательной и положительной фазы определяют различия в степени её влияния на колебания АТПО. В 1950—1986 гг. связь с колебаниями АТПО как в Северной Пацифике, так и в Северной Атлантике выражена слабо (рис. 15а).

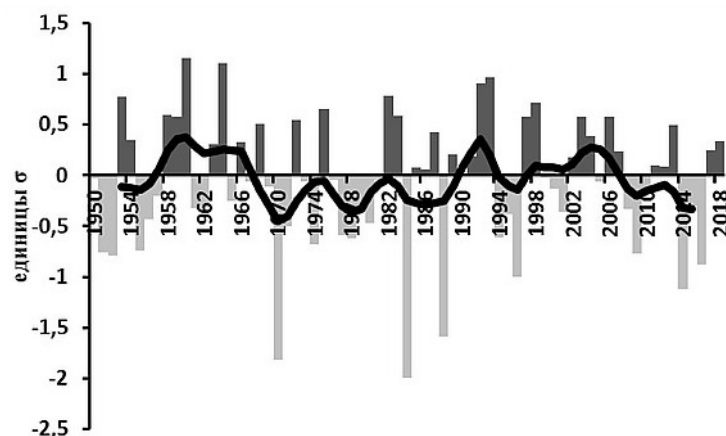


Рис. 13. Изменения среднего зимнего (январь-март) индекса ВА/ЗР в 1950—2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

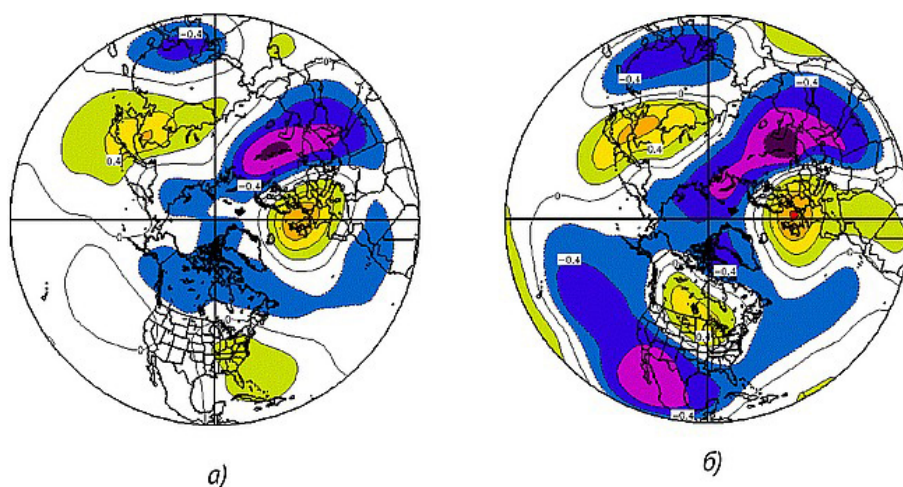


Рис. 14. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ВА/ЗР и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1950—1986 гг. (а) и 1987—2018 гг. (б)

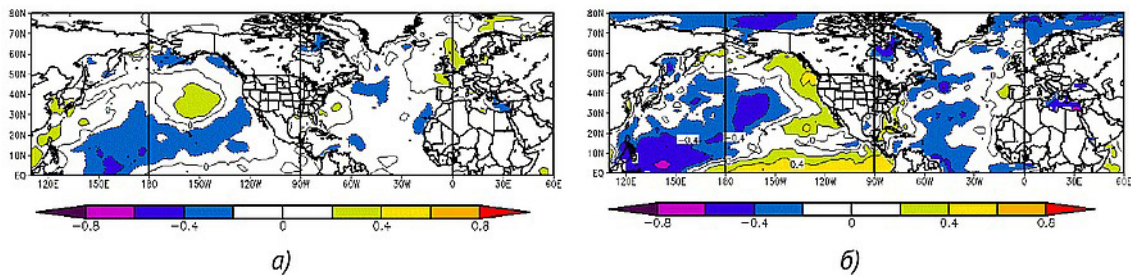


Рис. 15. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ВА/ЗР и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–1986 гг. (а) и в 1987–2018 гг. (б)

В последующий период (1987–2017 гг.) заметно усилилось её влияние на изменения поверхностных аномалий температуры воды на юге Северной Пацифики (рис. 15). Развитие положительной фазы ВА/ЗР, наблюдавшееся в 1989–2007 гг. (рис. 13), способствовало похолоданию вод в приэкваториальной юго-западной части океана и росту ТПО вдоль экватора восточнее 180° в. д. При переходе к отрицательной фазе ВА/ЗР в 2008 г., тенденции в изменениях ТПО в указанных районах сменились на противоположные:

В атмосфере над северотихоокеанским регионом выделены три основные ветви дальних связей: тихоокеанско-североамериканская ДС, ДС «тропики — умеренные широты Северного полушария» и западно-тихоокеанская ДС [Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987].

Тихоокеанско-североамериканская дальняя связь (ТСА) представляет собой одну из главных мод низкочастотной атмосферной изменчивости во внетропических широтах Северного полушария. Положительной фазе ТСА соответствуют центры положительных аномалий геопотенциальных высот в районе Гавайских островов и над западной частью Канады и два центра отрицательных аномалий, расположенных, соответственно южнее Алеутских островов и над юго-востоком США (рис. 16). ТСА связана с сильными флуктуациями восточноазиатского струйного течения в средней тропосфере [Climate Prediction Center — Pacific/North American, 2018]. Положительная фаза ТСА соответствует интенсивному струйному течению и его распространению на восток, к западному побережью США. Отрицательная фаза ТСА связана с более западным положением струи течения,

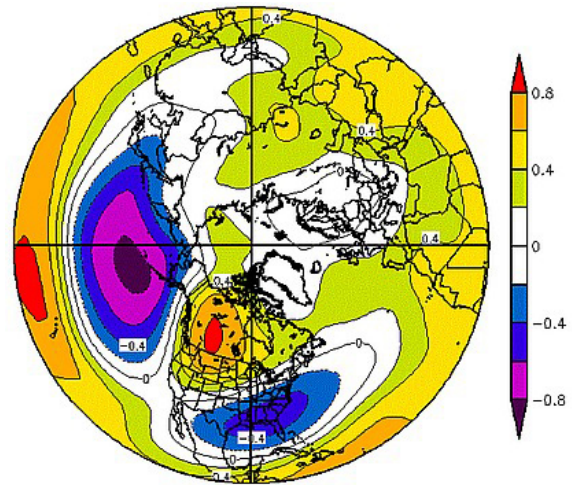


Рис. 16. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ТСА и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1950–2018 гг.

прижимающейся к восточному побережью Азии, и формированием блокирующих антициклонов над высокими широтами Северной Пацифики.

На изменения ТСА сильное влияние оказывают явления Эль-Ниньо/Южное колебание [Renwick, Wallace, 1996; Yu et al., 2009]. Развитие её положительной фазы происходит в годы развития явлений Эль-Ниньо, а отрицательной — в годы Ла-Нинья, т. е. в годы похолодания поверхностных вод в экваториальном поясе Тихого океана.

Многолетние изменения индекса ТСА свидетельствуют о преобладании её отрицательной фазы в 1950–1976 гг. и 2005–2018 гг., а положительной — в период с 1977 по 2004 г. (рис. 17).

С ТСА тесно связана тихоокеанская десятилетняя осцилляция (ТДО) в поле АТПО Северной Пацифики. Её положительная фаза

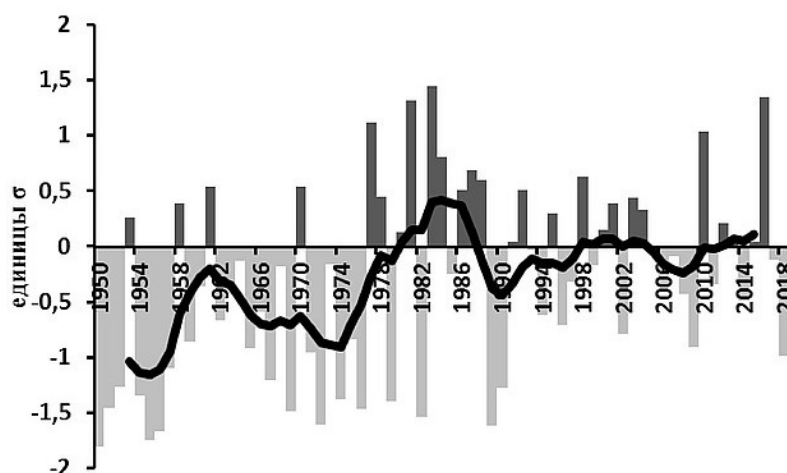


Рис. 17. Изменения среднего зимнего (январь-март) индекса ТСА в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

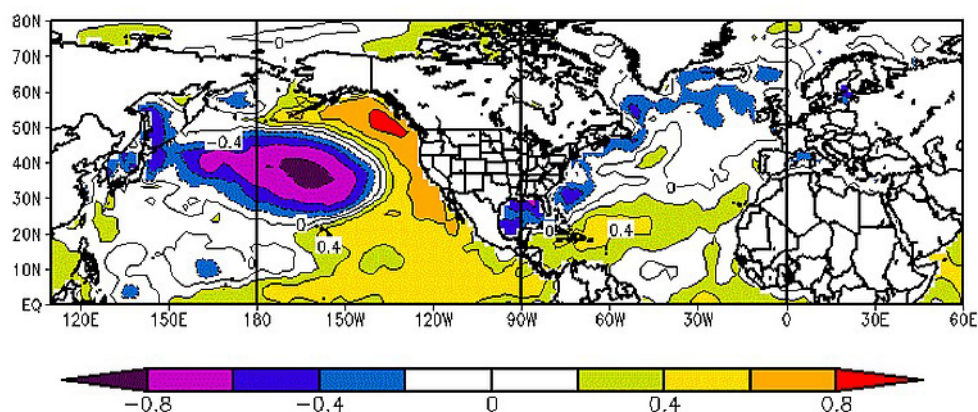


Рис. 18. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ТСА и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–2018 гг.

совпадает с положительной фазой тихоокеанско-североамериканской ДС и характеризуется формированием положительных аномалий ТПО вдоль всего западного побережья Северной Америки и обширной области аномалий противоположного знака в центральной части Северной Пацифики (рис. 18). Как видно из рис. 18, влияние ТСА на изменения ТПО прослеживается в Охотском море и в районе к востоку от о. Хоккайдо. В Северной Атлантике влияние ТСА на изменчивость АТПО проявляется на акватории её юго-западной части, где располагается атлантический центр этой ветви дальних атмосферных связей.

Дальняя связь «тропики — умеренные широты Северного полушария» (ТСП) проявляется только в зимний период года — с декабря по февраль [Climate Prediction Center — Tropical/Northern Hemisphere,

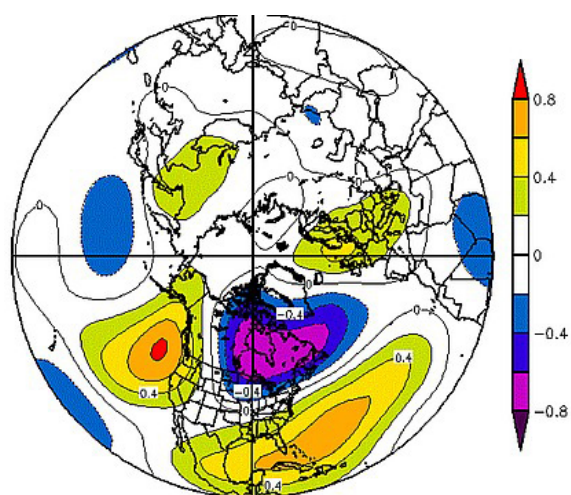


Рис. 19. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ТСП и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1951–2018 гг.

2018]. Положительная фаза этой ДС включает центры положительных аномалий геопотенциальных высот у северо-западного побережья Северной Америки и в районе Кубы, а также центр их отрицательных аномалий, расположенный над Гудзоновым заливом (рис. 19). ТСП отражает крупномасштабные изменения в положении и степени продвижения тихоокеанского струйного течения на восток, а также изменения в интенсивности и положении циклона Гудзонова залива [Climate Prediction Center — Tropical/Northern Hemisphere, 2018].

Многолетние изменения индекса ТСП характеризуются преобладанием его отрицательной фазы в период 1951–1983 гг. и положительной — в 1984–2018 гг. (рис. 20).

Влияние ТСП на колебания АТПО в Северном полушарии в период преобладания её отрицательной фазы было незначительным. Вклад этой дальней связи в изменчивость температурных аномалий значительно возрос

в 1987–2018 гг. Интенсификация положительной фазы ТСП, особенно после 2006 г., способствовала понижению ТПО у западного побережья Северной Америки, в восточной части экваториального пояса Тихого океана и у северо-западного побережья Африки (рис. 21).

Западно-тихоокеанская дальняя связь (ЗТ) — одна из двух ведущих мод низкочастотной изменчивости атмосферы над Северной Пацификой. Она была подробно описана в работах [Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987]. В зимние и весенние месяцы эта ДС представляет собой меридиональный диполь, один центр которого расположен над Камчаткой, а другой, обширный центр противоположного знака покрывает районы Юго-Восточной Азии и западную часть тропического пояса Северной Пацифики (рис. 22). Ещё один слабый центр отрицательных аномалий геопотенциальных высот расположен у юго-западного побережья США.

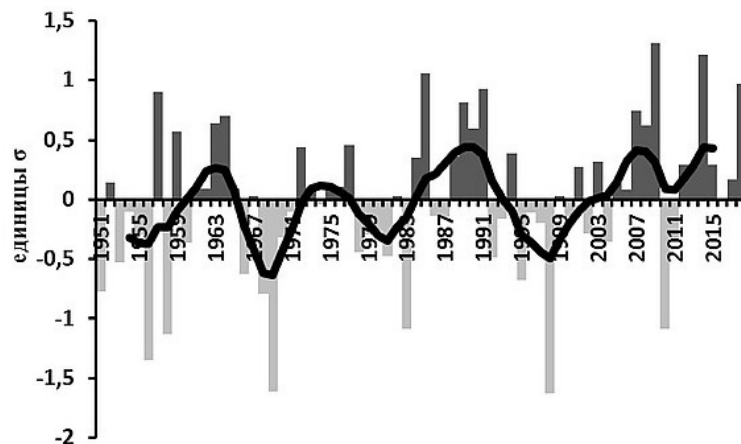


Рис. 20. Изменения среднего зимнего (декабрь-февраль) индекса ТСП в 1951–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

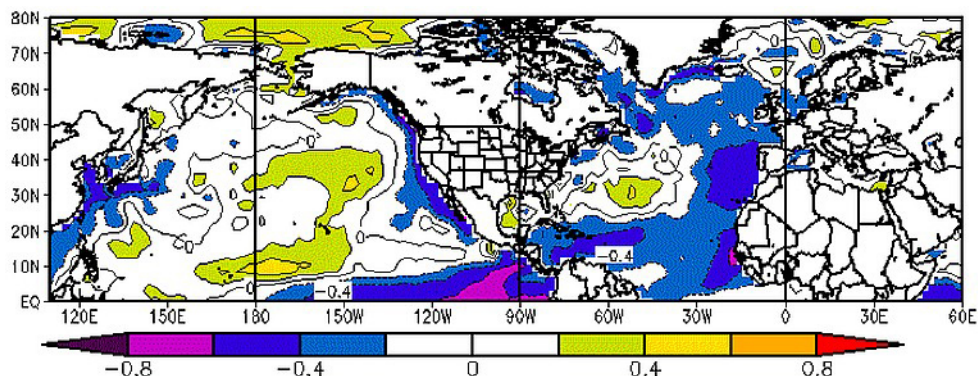


Рис. 21. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ТСП и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1987–2018 гг.

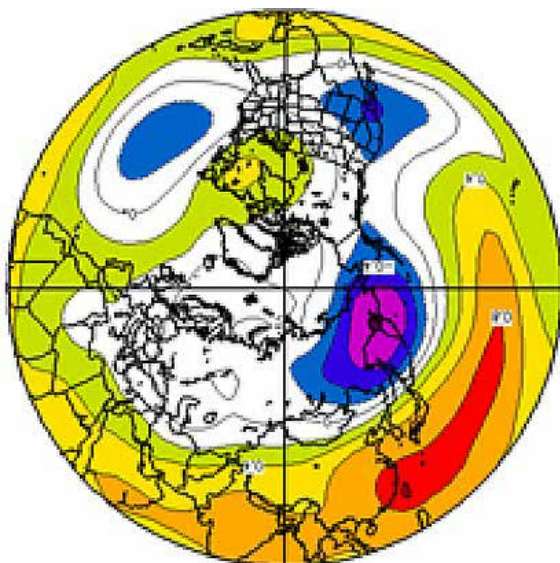


Рис. 22. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ЗТ и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1950–2018 гг.

Значительное усиление положительной или отрицательной фазы ЗТ отражает ярко выраженные зональные или меридиональные вариации в положении и интенсивности восточноазиатского струйного течения в районе его начала [Barnston, Livezey, 1987; Climate Prediction Center — West Pacific, 2018].

ЗТ имеет баротропную структуру. Его приземным аналогом является северотихоокеанское колебание, представляющее собой меридиональный диполь с центром отрицательных аномалий приземного атмосферного давления над Беринговым морем и центром аномалий

противоположного знака в субтропических широтах Северной Пацифики (положительная фаза) [Linkin, Nigam, 2008].

Отрицательная фаза ЗТ преобладала в период 1950–1986 гг., а положительная — в 1987–2018 гг. (рис. 23).

Характер влияния ЗТ на колебания аномалий ТПО в периоды развития её отрицательной и положительной фазы несколько различен. В 1950–1986 гг. был хорошо выражен диполь в изменениях АТПО в западной половине Северной Пацифики (рис. 24 а). Знаки коэффициентов корреляций на этом рисунке предполагают, что при положительных значениях индекса ЗТ температура на поверхности океана снижается в районе к юго-востоку от Камчатки и растёт южнее и юго-восточнее Японских островов. Фактически, в эти годы наблюдались отрицательные значения индекса ЗТ, т. е. в период 1951–1986 гг. температура в СЗТО росла, а в юго-западной части океана понижалась.

В период развития положительной фазы (1987–2018 гг.) западно-тихоокеанская ДС оказывала влияние на колебания АТПО практически на всей акватории Северной Пацифики (рис. 24 б). В это время распределение температурных аномалий имело «подковообразную» структуру, соответствующую одной из двух ведущих мод изменчивости АТПО в Северной Пацифике. Из-за своей формы её также называют «модой Виктория» (Victoria mode).

На климат Северного полушария большое влияние оказывает явление **Эль-Ниньо** —

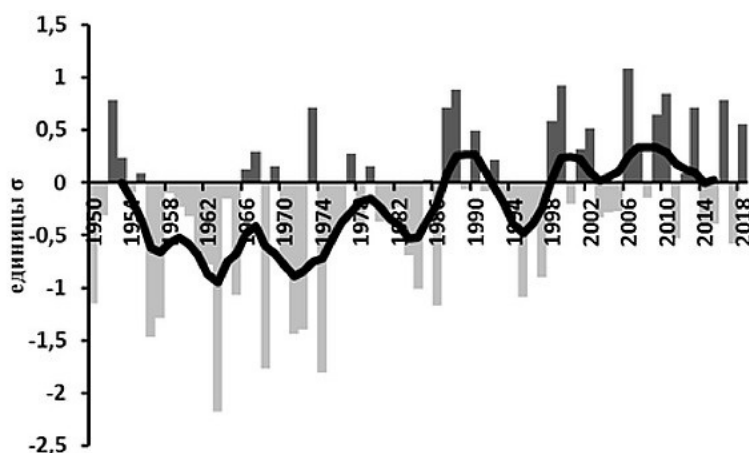


Рис. 23. Изменения среднего зимнего (январь-март) индекса ЗТ в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

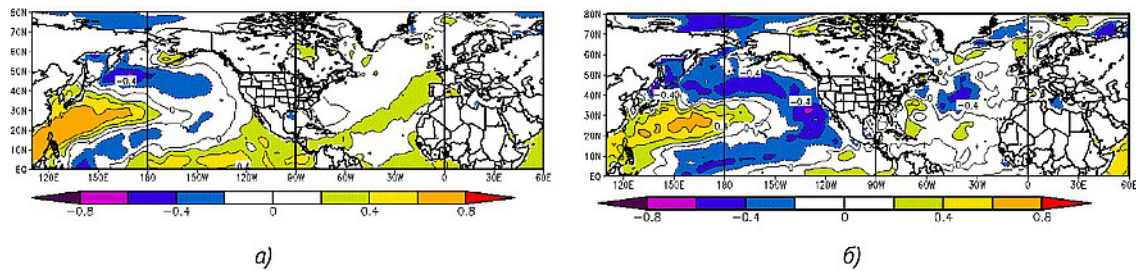


Рис. 24. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ЗТ и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–1986 гг. (а) и 1987–2018 гг. (б)

Южное колебание (ЭНЮК). ЭНЮК — результат взаимодействия тропического пояса Тихого океана с атмосферой. Термин «Эль-Ниньо» применяется для исключительного по силе, продолжительности и пространственному распространению потепления поверхностных вод от 180° з. д. (центральная часть океана) до берегов Перу и далее на юг вдоль побережья Чили. Оно резко отличается от ежегодно наблюдаемых сезонных (конец декабря — начало марта) потеплений, когда значения аномалий температуры воды составляют не более $1\text{--}2^\circ\text{C}$. Аналогичные явления резкого похолодания получили название Ла-Нинья.

Для целей долгосрочного прогнозирования представляют интерес многодекадные колебания индекса ЮК, который представляет собой разность нормированных аномалий приземного атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин (Австралия) (рис. 25). В период 1950–2018 гг. выделяются две эпохи положительных значений ЮК, соответственно, 1951–1976 гг. и 1999–2014 гг. В 1977–1998 гг.

и 2015–2018 гг. преобладали отрицательные значения ЮК.

Для выделения явлений потепления и похолодания используют аномалии ТПО в области «Nino 3» (5° с. ш. — 5° ю. ш.; 150° в. д. — 90° з. д.). Порогом для выделения Эль-Ниньо служит $\Delta t \geq 0,5^\circ\text{C}$, а для Ла-Нинья — $\Delta t \leq -0,5^\circ\text{C}$. Атмосферные и океанические механизмы формирования Эль-Ниньо подробно рассмотрены в работах [Петросянц и др., 2005; Trenberth et al., 1998].

В последние годы для характеристики ЭНЮК используют его многовариантный индекс. Для его вычисления используют скользящие двухмесячные данные: давления на уровне моря, зональную и меридиональную компоненты поверхностного ветра, ТПО, температуру воздуха, долю общей облачности над тропической зоной Пацифики [Wolter, Timlin, 1998].

ДАЛЬНИЕ СВЯЗИ В ОКЕАНЕ

Атлантическая многодекадная осцилляция (АМО), впервые описанная в работе

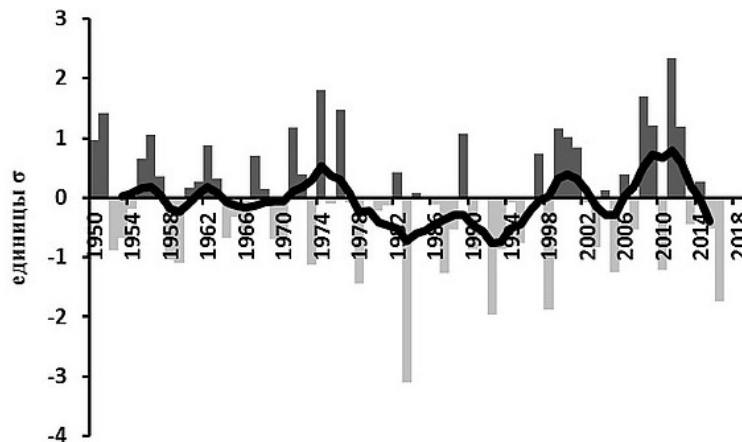


Рис. 25. Динамика индекса ЮК (декабрь-февраль) в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

[Schlesinger, Ramankutty, 1994], представляющей собой ведущую моду изменчивости АТПО в Северной Атлантике. Индекс АМО представляет собой временной ряд осреднённых от экватора до 70° с. ш. АТПО в Северной Атлантике после удаления из этого ряда линейного тренда.

Пространственная структура АМО характеризуется преобладанием аномалий ТПО одного знака на большей части акватории Северной Атлантики (рис. 26). Центр слабых аномалий противоположного знака располагается у восточного побережья США. Распределение АТПО, приведённое на рис. 26, соответствует положительной фазе АМО. С АМО положительно связаны колебания температурных аномалий в южной половине Северной Пацифики. Особенно тесная связь наблюдается на юго-западе её акватории.

В изменениях индекса АМО за 1856–2018 гг. хорошо выражен цикл продолжи-

тельностью 50–70 лет (рис. 27). Как видно из рис. 27, наблюдавшиеся с середины XIX в. периоды потепления, как правило, имели продолжительность около 40 лет, а периоды похолодания — около 20 лет. При этом на фоне многодекадных колебаний обнаруживались колебания меньшего временного масштаба, преимущественно, десятилетние (декадные). Последний период потепления, начавшийся в 1996 г., длится более 20 лет и, вероятно, продолжится до конца 2020-х гг.

Физический механизм возникновения АМО пока неясен. В математических моделях изменчивость ТПО, характеризующую АМО, связывают со слабыми изменениями Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) [O'Reilly et al., 2016]. Однако историческая продолжительность океанических наблюдений недостаточна для связывания расчётного индекса АМО с аномалиями современной циркуляции.

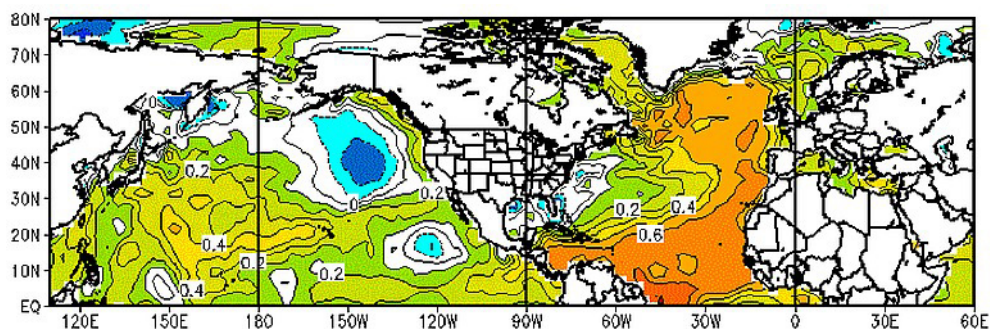


Рис. 26. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (январь–апрель) индексом АМО и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–2018 гг.

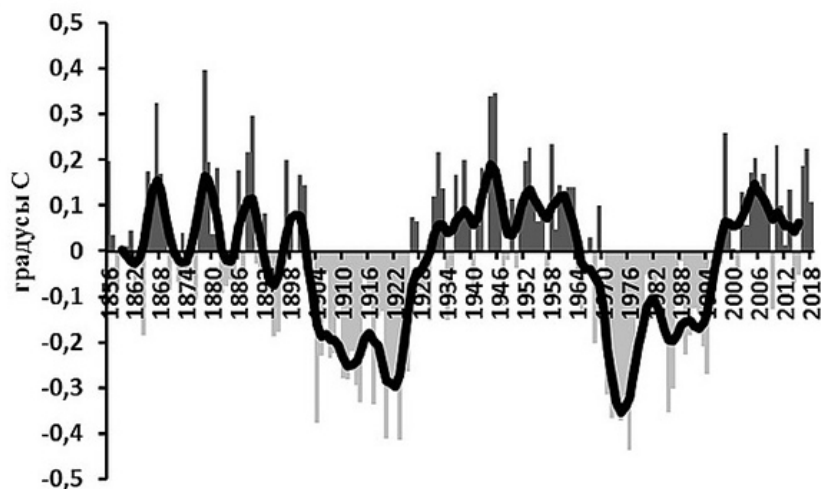


Рис. 27. Изменения среднего зимнего индекса АМО в 1856–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

В то же время АМО достаточно тесно связана с атмосферной циркуляцией над североатлантическим регионом. При его положительной фазе наблюдается рост атмосферного давления в высоких широтах с центром южнее Гренландии и снижение давления в субтропических широтах океана с центром у северо-западного побережья Африки (рис. 28). Такой характер поля аномалий приземного атмосферного давления схож со структурой атмосферных аномалий при отрицательной фазе САК. Поэтому не вызывает удивления факт, что после установления положительной фазы АМО в 1996 г. наметилась чёткая тенденция к снижению индекса североатлантического колебания.

Годовой индекс АМО тесно коррелирует с температурой воздуха и количеством осад-

ков над большей частью Северного полушария, в частности, над Северной Америкой и Европой. С фазами АМО также связана частота сильнейших ураганов в Северной Атлантике [Chylek, Lesins, 2008; Goldenberg et al., 2001].

Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО) была впервые описана в работе [Mantua et al., 1997]. Она является ведущей модой изменчивости АТПО в Северной Пацифике к северу от 20° с. ш. Индекс ТДО представляет собой временной ряд нормированных значений первой главной компоненты среднемесячных значений аномалий ТПО. Положительная фаза ТДО характеризуется потеплением поверхностных вод вдоль западного побережья Северной Америки и их похолоданием в обширном районе между 30° и 50°

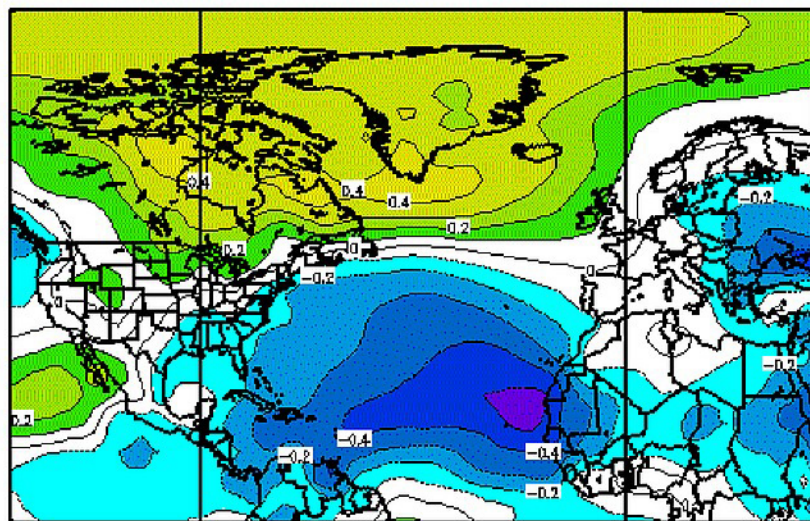


Рис. 28. Коэффициенты корреляции между индексом АМО и приземным атмосферным давлением в зимний сезон в Северной Атлантике для зимнего сезона (январь-март) за период 1950–2018 гг.

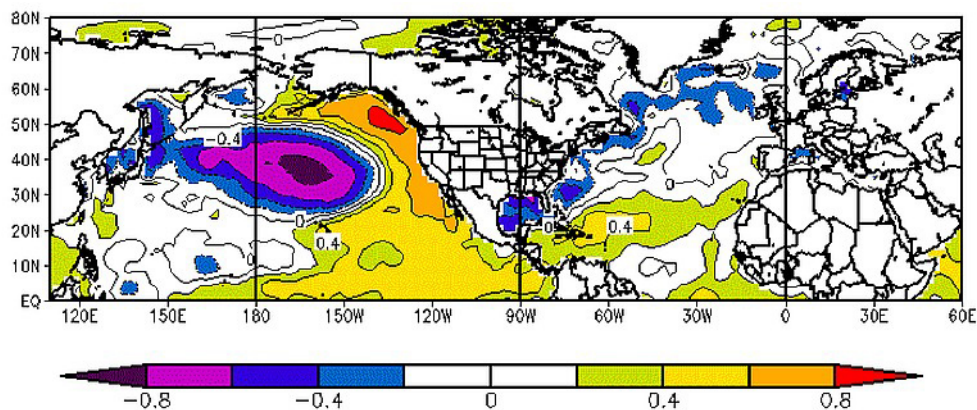


Рис. 29. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (январь-апрель) индексом ТДО и полями АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–2018 гг.

и, простирающемся от Азиатского побережья до $130\text{--}140^\circ$ з. д. (рис. 29). Влияние ТДО прослеживается и в юго-западной части субтропической зоны Северной Атлантики.

Структура поля корреляций между индексом ТДО и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в зимний период года соответствует описанной выше структуре ТСА (рис. 30).

Наряду с изменчивостью на временном масштабе порядка 10–15 лет, колебания индекса ТДО обнаруживают цикличность с периодом порядка 50 лет (рис. 31). Положительная фаза тихоокеанской декадной осцилляции преобладала в 1923–1945 гг. и 1977–2006 гг., а отрицательная — в 1946–1976 гг. и после 2006 г. Однако в 2014 г. произошёл неожиданный переход к положительной фазе ТДО, вследствие аномального потепления вод на северо-востоке Северной Пацифики. Это потепление сохранялось и в 2015–2018 гг.

Пространственная структура ТДО схожа со структурой поля АТПО в Северной Пацифике, обусловленной развитием явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья. Однако между ними существуют серьёзные различия. Во-первых, продолжительность «тёплых» и «холодных» режимов, связанных с ТДО, составляет 20–30 лет, в то время как время существования АТПО, формирующихся при развитии явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья, не превышает 618 месяцев. Во-вторых, климатические аномалии, характерные для ТДО, проявляются, прежде

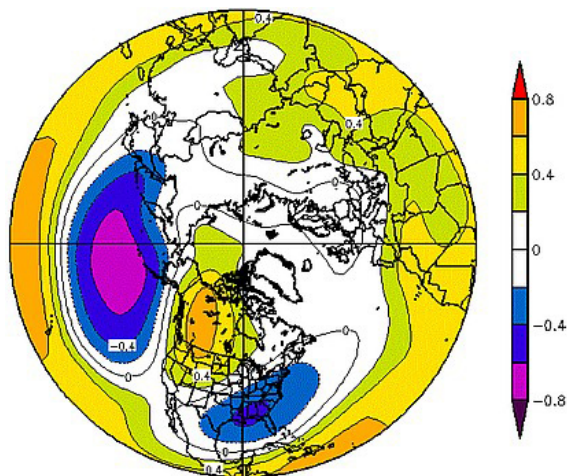


Рис. 30. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним индексом ТДО (январь–апрель) и геопотенциальными высотами поверхности 500 гПа в Северном полушарии в 1950–2018 гг.

всего, в умеренных широтах Северной Пацифики и в меньшей степени в тропической зоне, тогда как для эпизодов Эль-Ниньо характерна обратная ситуация.

Осцилляция северо-тихоокеанских круговоротов (ОСТК) была впервые описана в работе [Di Lorenzo et al., 2008]. Индекс ОСТК представляет собой главную компоненту, т. е. временной ряд второй эмпирической ортогональной функции (ЭОФ2) поля аномалий динамических высот уровня моря (топографии морской поверхности) в районе $180\text{--}110^\circ$ з. д. и $25\text{--}62^\circ$ с. ш. Учитывая, что аномалии динамических высот отражают изменения геостро-

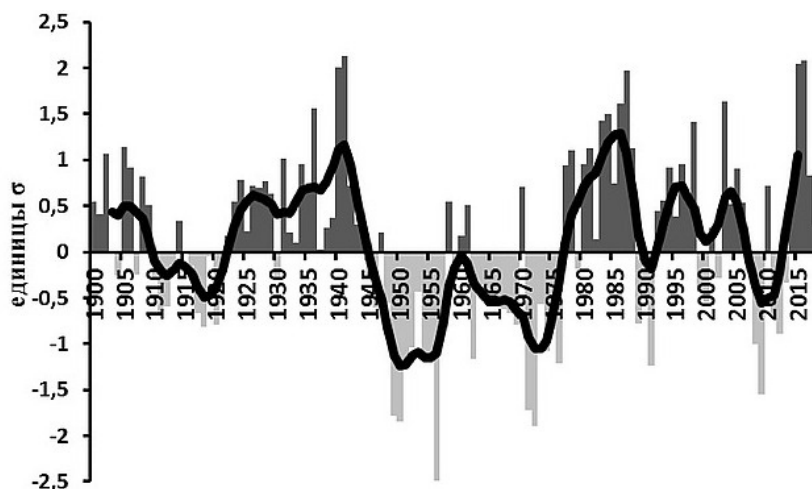


Рис. 31. Изменения среднего зимнего индекса ТДО в 1900–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

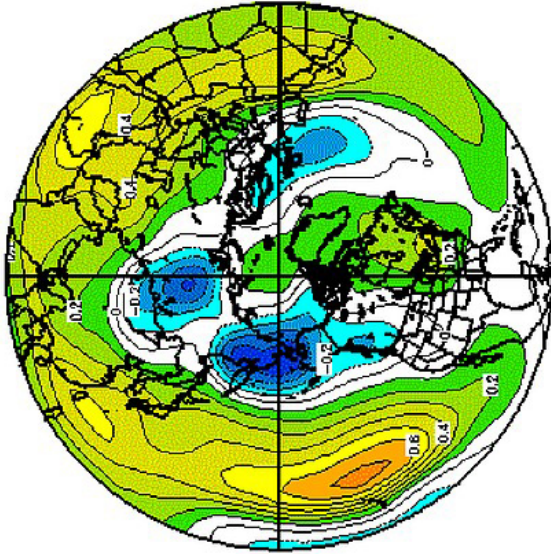


Рис. 32. Коэффициенты корреляции между индексом ОСТК (январь-апрель) и средним зимним полем приземного атмосферного давления в Северном полушарии в 1950–2018 гг.

фической циркуляции, предложенный индекс характеризует интенсивность субарктического и субтропического океанических круговоротов Северной Пацифики. В периоды положительной фазы ОСТК происходит усиление циркуляции в обоих круговоротах. При этом пространственная структура поля ветровых аномалий соответствует положительной фазе северотихоокеанского колебания (СТК), которое представляет собой доминантную моду изменчивости приземного атмосферного давления. СТК имеет два центра. Один из них расположен над северной частью Берингова моря, а второй, с аномалиями противоположного знака, — в тропической зоне Северной Пацифики, к северу от Гавайских островов (рис. 32). Когда индекс ОСТК положителен, ветровое воздействие создаёт благоприятные условия для развития апвеллинга и формирования отрицательных АТПО в Аляскинском

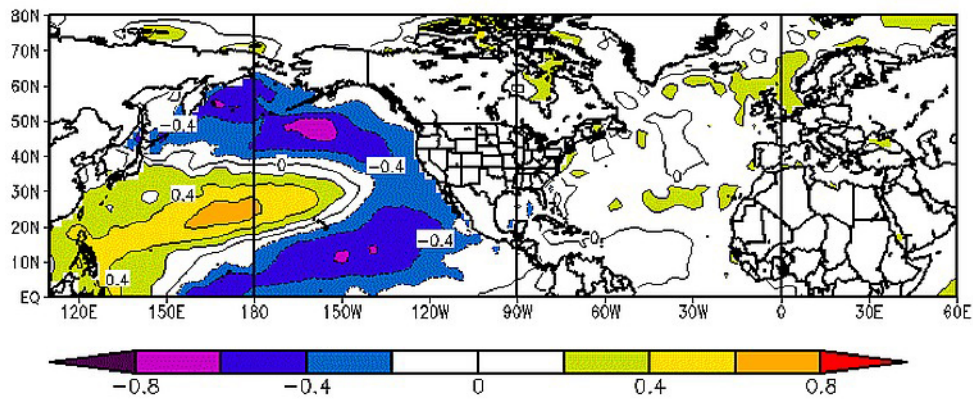


Рис. 33. Распределение коэффициентов корреляции между средним зимним (январь-апрель) индексом ОСТК и АТПО в Северной Атлантике и Северной Пацифике в 1950–2018 гг.

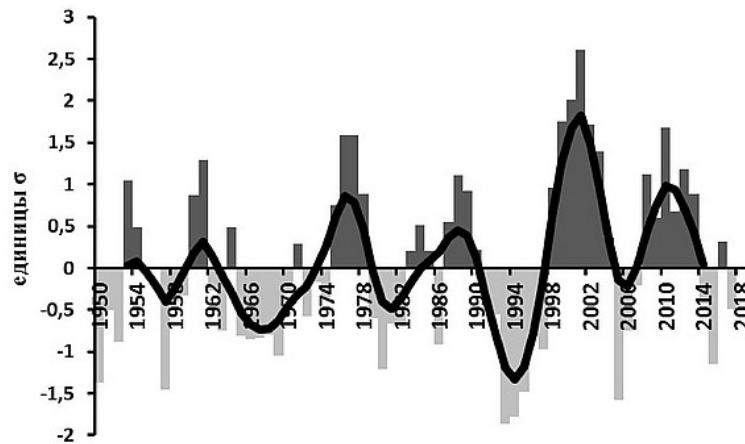


Рис. 34. Изменения среднего зимнего индекса ОСТК в 1950–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению

круговороте и вдоль северной периферии субарктического круговорота. В районе Восточной Камчатки и в восточной части Охотского моря повышенная теплоотдача с морской поверхности за счёт преобладания ветров северных румбов на западном фланге северного центра СТК приводит к дальнейшему усилению отрицательных аномалий ТПО.

Пространственная структура поля корреляций на рис. 33 хорошо соответствует второй доминирующей моде изменчивости АТПО в северной части Тихого океана — моде «Виктория» [Bond et al., 2003].

Изменения индекса ОСТК демонстрируют ярко выраженную декадную изменчивость (рис. 34). Приведённый рисунок свидетельствует также о возможных долгопериодных колебаниях индекса. Так, в 1951–1997 гг., в целом, наблюдалось преобладание его отрицательных значений, а в 1998–2018 гг. — положительных. Однако длина временного ряда (1950–2018 гг.) не позволяет уверенно судить о наличии долгопериодных циклов в изменениях индекса ОСТК.

ПРИМЕРЫ ВЛИЯНИЯ ДС В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ НА СОСТОЯНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОПУЛЯЦИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Изменчивость, связанная, в частности, с ОСТК, позволяет объяснить многие изменения в состоянии различных промысловых объектов северной части Тихого океана, в том числе в дальневосточном регионе.

При поиске ведущих климатических факторов, влияющих на состояние того или ино-

го промыслового запаса, часто оказывается полезным расчет коэффициентов корреляции между временными рядами биологических характеристик, например, коэффициентов выживания или численности пополнения, и крупномасштабными полями климатических характеристик (АТПО, атмосферного давления). Сравнение распределения полученных коэффициентов корреляции с ведущими пространственными модами взаимодействия океана с атмосферой (дальними связями) позволяет не только выявить основные климатические факторы, оказывающие влияние на популяцию, но и лучше понять причины наличия долговременных тенденций в их изменениях. Ниже приводится пример использования данного подхода к анализу изменчивости запасов восточно-камчатского минтая и минтая северной части Охотского моря.

Восточно-камчатский минтай. На рис. 35 приведена карта, показывающая связь пополнения восточно-камчатского минтая с полем зимних (январь-апрель) АТПО в северотихоокеанском регионе. Для расчётов биологический временной ряд был смещен к году нереста, т. е. на 3 года назад. Таким образом, расчётный период охватывал 1963–2008 гг.

Как видно из рис. 35, наблюдается обратная (отрицательная) корреляционная связь между численностью пополнения этого запаса минтая и АТПО в районах его нереста и раннего онтогенеза у Восточной Камчатки: более урожайные поколения формируются при развитии отрицательных аномалий ТПО на нерестилищах, и наоборот.

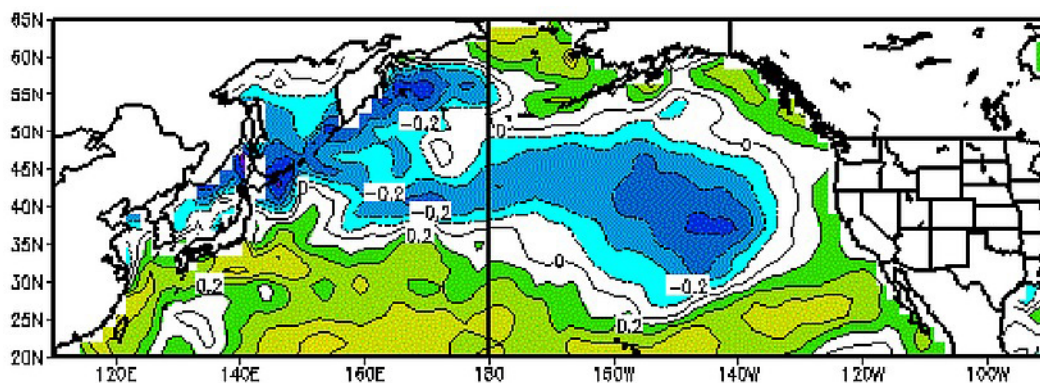


Рис. 35. Распределение коэффициентов корреляции между численностью пополнения восточно-камчатского минтая в возрасте 3 года и полем зимних АТПО в Северной Пацифике (1963–2008 гг.)

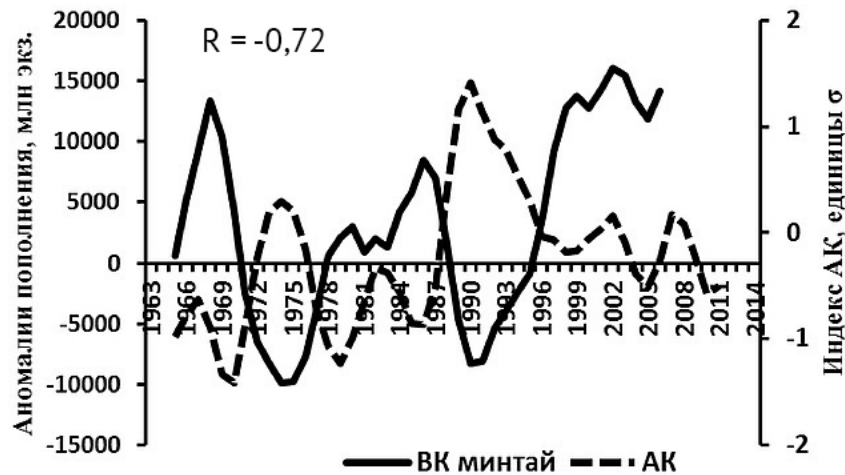


Рис. 36. Сглаженные 5-летним скользящим осреднением временные ряды зимнего индекса АК и пополнения восточно-камчатского минтая в возрасте 3 года

Следует отметить, что структура корреляционного поля, показанная на рис. 35, хорошо соответствует пространственной структуре поля корреляций между зимним индексом Арктического колебания и АТПО в Северной Пацифике, но с обратным знаком. Следовательно, можно ожидать наличие тесной противофазной связи между колебаниями индекса АК и численностью пополнения минтая у Восточной Камчатки. Действительно, такая связь существует и характеризуется коэффициентом корреляции, равным $-0,72$ (рис. 36). Для более наглядного представления характера связи в многолетнем аспекте временные ряды индекса АК и численности поколений минтая были сглажены 5-летним скользящим осреднением.

Таким образом, АК оказывает значительное влияние на состояние запаса восточно-камчатского минтая через изменения термического режима поверхностных вод в районе его нереста и раннего онтогенеза.

Минтай северной части Охотского моря. На рис. 37 приведена гистограмма аномалий коэффициентов выживания (КВ) минтая в северной части Охотского моря относительно нормы за 1980–2010 гг. КВ определены как отношение численности рыб в возрасте 3 года к биомассе нерестового запаса в год рождения поколения. При этом временной ряд численности был смещён к году нереста, т. е. на 3 года назад. Таким образом, анализируемый период охватывал 1980–2010 гг.

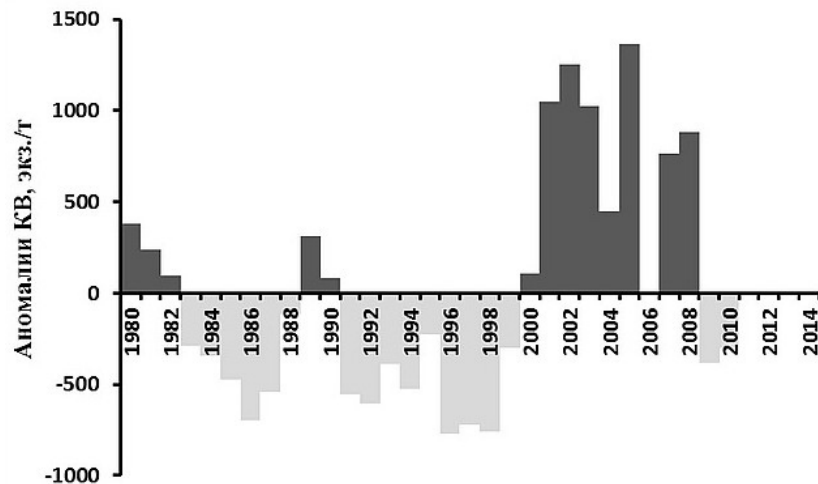


Рис. 37. Аномалии коэффициентов выживания охотоморского минтая северной части Охотского моря в 1980–2010 гг.

Многолетние изменения коэффициента обнаруживают два периода с различным средним уровнем его колебаний. Первый период (1983–1999 гг.) характеризуется преобладанием отрицательных аномалий КВ, отражающих пониженную выживаемость поколений минтая этих лет. Начиная с 2000–2001 гг., ситуация резко изменилась, и вплоть до 2008 г. складывались условия, благоприятные для формирования более урожайных поколений этого объекта промысла.

Резкие изменения в ходе КВ минтая хорошо согласуются с режимными сдвигами в многолетних колебаниях АТПО в дальневосточном регионе. На рис. 38 показан график осреднённых за февраль-апрель температурных аномалий в северо-западном районе Тихоокеанского бассейна. Период осреднения охватывает преднерестовую и нерестовую стадии жизненного цикла охотоморского минтая. Указанный район был выделен на основе анализа пространственной структуры колебаний АТПО в Северной Пацифике методом кластерного анализа (район 3Т) [Krovvin, 1995]. Границы района на севере и юге проходят по параллелям, соответственно, $55,5^{\circ}$ с. ш. и $47,5^{\circ}$ с. ш., на западе он ограничен западным побережьем Охотского моря, а на востоке — меридианом $177,5^{\circ}$ в. д. Колебания АТПО в районе 3Т в значительной мере определяются интенсивностью северного центра западно-тихоокеанской дальней связи.

Как видно из рис. 38, режимный сдвиг в колебаниях АТПО произошёл в 1999 г., т. е. на 1–2 года раньше соответствующего сдвига в многолетних изменениях коэффициентов выживания минтая. При этом с конца 1990-х годов преобладали отрицательные аномалии ТПО, а в предшествующий период (1980–1998 гг.) — положительные. Таким образом, связь между выживаемостью поколений минтая и поверхностной температурой воды в преднерестовый и нерестовый периоды — обратная: выживаемость снижается, когда температура воды выше нормы, и наоборот. Коэффициент корреляции между временными рядами КВ и АТПО при сдвигах от 0 до 2 лет (изменения температуры опережают изменения коэффициента выживания) существенно не меняется и составляет, в среднем $-0,40$. Причины такой устойчивой связи между анализируемыми характеристиками будут рассмотрены ниже.

Для выявления ведущего климатического фактора, определяющего многолетнюю изменчивость АТПО на северо-западе Тихого океана и, как следствие, условия выживания поколений минтая, рассчитаны коэффициенты корреляции между временным рядом КВ и временными рядами аномалий ТПО, осреднённых за февраль-апрель, в узлах 2-градусной сетки на акватории Северной Пацифики (рис. 39). Как и следовало ожидать, максимальные по абсолютным значениям отрицательные корреляции

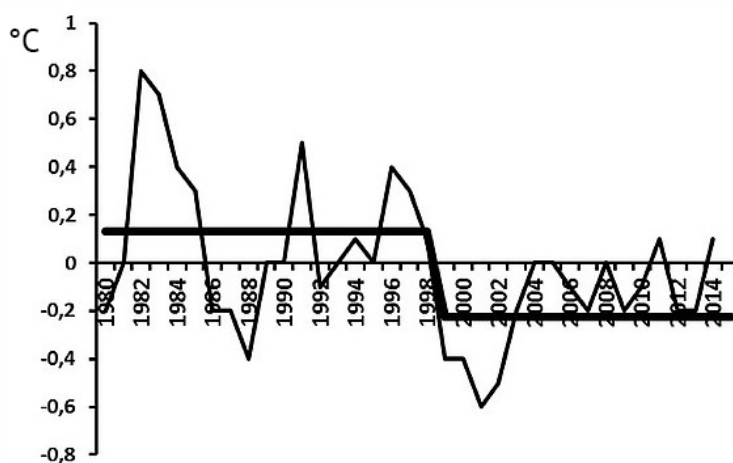


Рис. 38. Многолетние колебания АТПО (февраль-апрель) в северо-западе Тихого океана в районе 3Т [Krovvin, 1995] в 1980–2014 гг. Ломаная линия показывает изменение среднего уровня колебаний температурных аномалий между 1980–1998 и 1999–2014 гг.

наблюдаются на северо-западе океана. В районах к югу и юго-востоку от полуострова Камчатка они превышают 0,75–0,80. В Охотском море изокорреляты располагаются меридионально, с постепенным снижением абсолютных значений коэффициентов корреляции от 0,65–0,70 у побережья Западной Камчатки практически до нуля в его западной части. Пояс отрицательных корреляций простирается от побережья Восточной Камчатки на восток, в залив Аляска, и далее на юг, вдоль берегов североамериканского континента, окружая обширную область положительных корреляций (до 0,45), занимающую более половины акватории океана.

Распределение коэффициентов корреляции между временным рядом КВ минтая се-

верной части Охотского моря и полем АТПО в Северной Пацифике обладает сходством со структурой поля корреляций между индексом осцилляции северо-тихоокеанских круговоротов (ОСТК) и теми же самыми рядами температурных аномалий. Анализ кросс-корреляционной функции между КВ и индексом ОСТК (февраль-апрель) показал, что максимальное значение коэффициента корреляции, равное 0,55, наблюдается при временном сдвиге в 2 года, когда изменения индекса опережают изменения коэффициента выживания. Поэтому не вызывает удивления хорошее соответствие основных пространственных особенностей корреляционных полей, представленных на рис. 40. Положение нулевой изокорреляты,

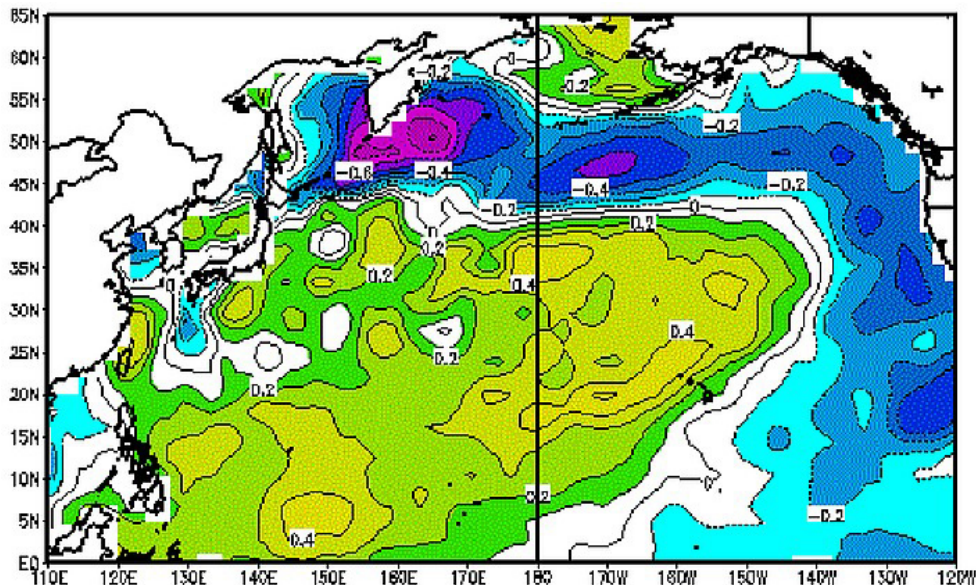


Рис. 39. Распределение коэффициентов корреляции между временным рядом аномалий КВ минтая северной части Охотского моря и зимним (февраль-апрель) полем АТПО в Северной Пацифике (1980–2010 гг.)

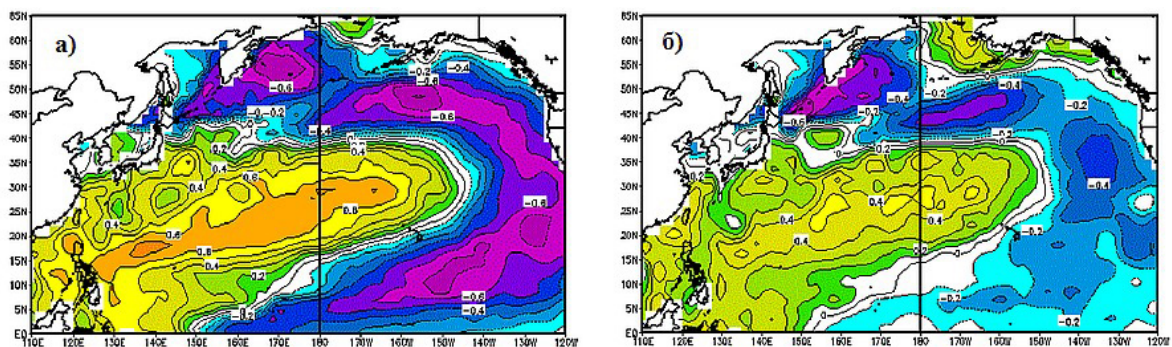


Рис. 40. Распределение коэффициентов корреляции между: индексом ОСТК и полем АТПО (а); временным рядом КВ и полем АТПО в Северной Пацифике со сдвигом 2 года назад (б).

Период — февраль-апрель 1980–2010 гг.

разделяющей крупномасштабные районы океана с противофазными колебаниями ТПО, на рис. 40а и 40б практически совпадает, хотя, естественно, соответствующие друг другу абсолютные значения коэффициентов корреляции для ряда КВ минтая в большинстве случаев ниже, чем для ряда индекса ОСТК.

Ещё более тесную положительную связь между индексом ОСТК и КВ демонстрирует рис. 41, на котором представлены интегральные кривые аномалий рассматриваемых характеристик. Кривая индекса смещена на 2 года вперёд относительно кривой коэффициентов выживания минтая. Коэффициент корреляции между временными рядами, использованными для построения графика, в этом случае составляет 0,86. Любая интегральная кривая отражает тенденции в изменениях анализируемого параметра. Таким образом, полученный высокий коэффициент корреляции свидетельствует о том, что связь между индексом ОСТК и КВ минтая северной части Охотского моря лучше проявляется в совпадении многолетних тенденций, чем в линейной связи между исходными рядами.

Как отмечалось ранее, когда индекс ОСТК положителен, ветровое воздействие создаёт благоприятные условия для развития апвеллинга и формирования отрицательных АТПО в Аляскинском круговороте и вдоль северной периферии субарктического круговорота. В районе Восточной Камчатки и в восточной части Охотского моря повышенная теплоотда-

ча с морской поверхности за счёт преобладания ветров северных румбов на западном фланге северного центра СТК приводит к дальнейшему усилению отрицательных аномалий ТПО. Связь коэффициентов выживания минтая с атмосферной циркуляцией, как и в случае поля АТПО, оказывается наиболее тесной при сдвиге в 2 года, когда изменения в атмосфере опережают изменения в КВ, в то время как при нулевом сдвиге во времени корреляции невелики. В этой связи, следует отметить, что формирование аномалий поверхностной температуры воды происходит в холодный сезон года. В последующий летний сезон они «маскируются» радиационным прогревом верхнего слоя, а с наступлением зимы вновь появляются на поверхности при развитии вертикальной конвекции, которая в шельфовых районах может достигать дна, а в открытом море охватывать слой в несколько сотен метров. Этим объясняется существование АТПО определённого знака на протяжении периода, длительность которого соответствует длительности наблюдающегося климатического режима.

Таким образом, существует тесная связь условий выживания минтая северной части Охотского моря с климатическими факторами, ведущим из которых в данном случае является изменчивость интенсивности субарктического океанического круговорота, зависящая, в свою очередь, от фазы СТК. Выявленный двухлетний сдвиг между климатическими изменения-

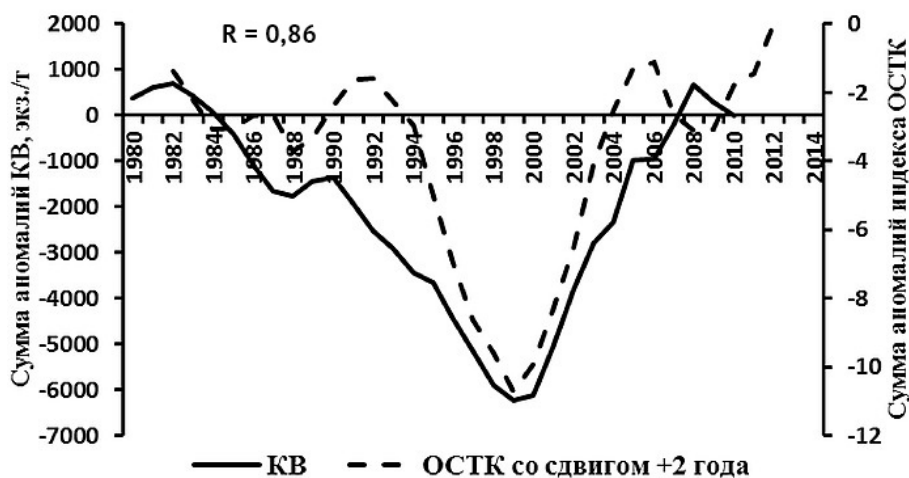


Рис. 41. Интегральные кривые аномалий КВ минтая в северной части Охотского моря и индекса ОСТК (февраль-апрель) со сдвигом в 2 года для периода 1980–2010 гг.

ми и КВ, по-видимому, соответствует времени реакции популяции минтая на режимные сдвиги в колебаниях регионального климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальная климатическая система характеризуется существованием так называемых дальних связей, которые представляют собой статистически значимые синхронные корреляции, главным образом, между метеорологическими характеристиками в удалённых друг от друга районах Земли.

Благодаря взаимодействию океана с атмосферой аномалии океанологических характеристик и, прежде всего, поверхностной температуры воды, распределены в пространстве не случайно, а тесно связаны с крупномасштабными особенностями атмосферной циркуляции, характеризующимися указанными дальними связями. Это подразумевает существование дальних связей и в океане.

Особенности проявления дальних связей, как правило, сохраняются на протяжении довольно длительных периодов времени, что приводит к существованию множественных квазистационарных режимов в системе океан-атмосфера. При этом, часто переход от одного климатического режима к другому происходит довольно быстро, а сами режимы проявляются на различных временных масштабах, в том числе от нескольких лет до нескольких десятилетий.

Климатический сдвиг во второй половине 1980-х годов, сопровождавшийся усилением САК и смещением его центров на восток, обусловил существенные изменения в положении и интенсивности центров других ветвей атмосферных ДС в североатлантическом, евразийском и западно-тихоокеанском регионах, а также в характере их воздействия на поверхностный слой вод в Северной Атлантике и Северной Пацифике.

ДС в атмосфере и океане оказывают существенное влияние на многолетние флуктуации численности пополнения и условия выживания основных объектов российского промысла. Так, выявлена тесная связь условий выживания минтая северной части Охотского моря с климатическими факторами, ведущим из которых в данном случае является изменчивость

интенсивности субарктического океанического круговорота, зависящая, в свою очередь, от фазы СТК/ОСТК. Выявленный двухлетний сдвиг между климатическими изменениями и КВ, по-видимому, соответствует времени реакции популяции минтая на режимные сдвиги в колебаниях регионального климата. В то же время, изменения численности пополнения минтая у Восточной Камчатки происходят в противофазе с изменениями среднего зимнего индекса арктического колебания.

Таким образом, представление о дальних связях в системе «океан-атмосфера», ретроспективный анализ связанных с ними климатических режимов и основанное на этом анализе предвидение ожидаемых изменений климата в том или ином регионе могут стать надёжной основой для средне- и долгосрочного прогнозирования тенденций изменения запасов многих объектов российского промысла.

ЛИТЕРАТУРА

- Визе В.Ю. 1927. Корреляция между состоянием метеорологических элементов в удалённых друг от друга частях земного шара. Метеорологический вестник. № 11. С. 229–239.
- Елизаров А.А., Родионов С.Н., Котенев Б.Н. 1990. Системный подход Г.К. Ижевского. Сопряжённость колебаний численности поколений трески в Северной Атлантике // Плен. докл. 8-й Всес. конф. по промысловой океанологии. С. 48–66.
- Ижевский Г.К. 1964. Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб. М.: Изд-во ВНИРО. 166 с.
- Малинин В.Н., Гордеева С.Н. 2009. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Т. 1. Изменчивость факторов среды обитания. СПб: Изд. РГГМУ. 278 с.
- Петросянци М.А., Семенов Е.К., Гущина Д.Ю., Соколихина Е.В., Соколихина Н.Е. 2005. Циркуляция атмосферы в тропиках. Климат и изменчивость. М.: МАКС Пресс. 640 с.
- Barnston A.C., Livezey R.E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Weather Rev. 115. P. 1083–1126.
- Bjornsson H., Venegas S.A. 1997. A manual for EOF and SVD analyses of climate data. McGill University, CCGCR Report. № 97-1. Montréal, Québec. 52p.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P. 2003. Recent Shifts in the State of the North

- Pacific // *Geophys. Res. Lett.* V. 30 (2183). doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL018597>.
- Chylek P., Lesins. G. 2008. Multidecadal variability of Atlantic hurricane activity: 1851–2007 // *J. Geophys. Res.* V. 113. № D22106. doi:10.1029/2008JD010036
- Climate Prediction Center — East Atlantic. Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>
- Climate Prediction Center — Pacific/North American. Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>
- Climate Prediction Center — Polar/Eurasia. Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur.shtml>
- Climate Prediction Center — Tropical/Northern Hemisphere/ Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/tnh.shtml>
- Climate Prediction Center — West Pacific/ Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>
- Cushing D.H. 1978. Biological effects of climatic change // *Rapp. P. — v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* V. 173. P. 107–116.
- Cushing D.H. 1982. Climate and fisheries. Academic Press: London. 373 pp.
- Cushing D.H., Dickson R.R. 1976. The biological Response in the Sea to climatic changes // *Advances in Marine Biology*. V. 14. P. 2–122.
- Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K.M., Franks P.J.S., Chlark K., Miller A.J., McWilliams J.C., Bograd S.J., Arango H., Curchister E., Powell T.M., Riviere P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change // *Geophys. Res. Lett.* V.35. L08607. doi:10.1029/2007GL032838
- Goldenberg S.B., Landsea C.W., Mestas-Nunez A.M., Gray W.M. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications // *Science*. V. 293. P. 474–479.
- Jung T., Hilmer M., Ruprecht E., Kleppek S., Gulev S.K., Zolina O. 2003. Characteristics of the Recent Eastward Shift of Interannual NAO Variability // *J. Climate*. V. 16. P. 3371–3382.
- Holland-Hansen B., Nansen F. 1920. Temperature variations in the North Atlantic Ocean and in the atmosphere. Washington. 243 p.
- Kawasaki T., Omori M. 1988. Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in mean temperature // *Int. Symp. on Long Term Changes in Marine Fish Populations* / T. Wyatt, M.G. Larraneta (eds.). Vigo, Spain. P. 273–290.
- Kronin A.S. 1995. A. Comparative study of climatic changes in the North Pacific and North Atlantic and their relation to the abundance of fish stocks // *Climate change and northern fish populations* / R.J. Beamish (ed.). Can. Spec. Publ. Aquat. Fish. Sci. V. 121. P. 181–198.
- Linkin M., Nigam S. 2008. The North Pacific Oscillation—West Pacific Teleconnection Pattern: Mature-Phase Structure and Winter Impacts // *J. Climate*. V. 21. P. 1979–1997.
- Lluch-Belda, D., Crawford, R.J.M., Kawasaki, T., MacCall, A.D., Parrish, R.H., Schwartzlose, R.A., Smith, P. 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science*. V. 8. P. 195–205.
- Lluch-Belda, D., Schwartzlose R.A., Serra R., Parrish, R.H., Kawasaki, T., Hedgecock D., Crawford, R.J.M. 1992. Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fish. Oceanogr.* V. 1. 339 p.
- Mantua J.N., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impact on salmon production // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* V. 78. P. 1069–1079.
- Namias J., Douglas A.V., Cayan D. 1982. Large-scale changes in North Pacific and North American weather patterns in recent decades. *Mon. Weather Rev.* V. 110. P. 1851–62.
- O'Reilly C.H., Huber L.M., Woollings T., Zanna L. 2016. The signature of low-frequency oceanic forcing in the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* V. 43. 2810–2818.
- Polovina J.J., Mitchum J.T., Graham N.E., Craig M.P., Demartini E.E., Flint E. 1994. Physical and biological consequences of a climate event in the central North Pacific // *Fish. Oceanogr.* V.3. № 1. P. 15–21.
- Renwick J.A., Wallace J.M. 1996. Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Nino, and the PNA pattern // *Mon. Wea. Rev.* V. 124. P. 2071–2076
- Rodionov S.N. 1995. Atmospheric teleconnections and coherent fluctuations in recruitment to North Atlantic cod (*Gadus morhua*) stocks // *Climate change and northern fish populations* / R.J. Beamish (ed.). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121. P. 45–55.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. V. 367. P. 723–726.
- Schwartzlose R.A., Alheit J., Bakun A., Baumgartner T., Cloete R., Crawford, R.J.M., Fletcher W.J., Green-Ruiz Y., Nevarez-Martinez M.O., Parrish, R.H., Roy R., Serra R., Shust K.V., Ward N.M., Zuzunaga J.Z. 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations // *South African J. of Marine Science*. V. 21. 289 p.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential

- height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. P. 1297–1300.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M.* 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // *J. Climate*. V. 13. P. 1000–1016.
- Thompson, D.W.J., Wallace J.M.* 2001: Regional Climate Impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode // *Science*. V. 293. P. 85–89.
- Trenberth K. E, Hurrell J.W.* 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*. V. 9. P. 303–319.
- Trenberth K.E., Branstator W.B., Karoly D., Kumar A., Lau N.-C., Ropelewski C.* 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures // *J. Geophys. Res.* V. 5. P. 14291–14324.
- Walker G.T.* 1928. World Weather // *Memor. Roy. Met. Soc.* V. 2. № 17. P. 97–124.
- Walker, G.T., Bliss E.W.* 1932. World weather V // *Mem. Roy. Meteor. Soc.* V. 4. P. 53–84.
- Wallace J.M., Gutzler D.S.* 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // *Mon. Weath. Rev.* V. 109. P. 784–812.
- Wallace J.M., Smith C., Jiang Q.* 1990. Spatial Patterns of Atmosphere-Ocean Interaction in the Northern Winter // *J. Climate*. V. 3. P. 990–998.
- Wolter K., Timlin M.S.* 1998. Measuring the strength of ENSO events — how does 1997/98 rank? // *Weather*. V. 53. P. 315–324.
- Yu B., Tang Y.M., Zhang X.B., Niitsoo A.* 2009. An analysis on observed and simulated PNA associated atmospheric diabatic heating // *Clim. Dyn.* V. 33(1). P. 75–91

Поступила в редакцию 29.08.2018 г.
Принята после рецензии 29.08.2018 г.

Aquatic biological resources

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

Teleconnections in the atmosphere and ocean as a basis of the long-range fishery forecasting

A.S. Krovinin,  V. Kotenev, N.V. Mordasova, G.P. Moury

Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»), Moscow

The global climatic system is characterized by existence of the so-called teleconnections which represent statistically significant synchronous correlations in the remote areas of Earth. In the paper, a review and detailed description of the main teleconnection patterns (TP) in the atmosphere and in the ocean is given. It has been shown that the climatic regime shift in the second half of the 1980s accompanied by strengthening of the North Atlantic Oscillation and eastward displacement of its centers resulted in essential changes in position and intensity of the centers of other teleconnection patterns in North Atlantic, Eurasian and West Pacific sectors and also in the character of their impact on surface water layer in the North Atlantic and North Pacific. The teleconnections in the atmosphere and ocean have significant effects on the long-term changes in recruitment and survival conditions of various target species. The close connection between survival conditions of walleye pollock in the northern Okhotsk Sea and intensity of the Subarctic gyre, which, in turn, depends on phase of the North Pacific Oscillation/North Pacific Gyre Oscillation was revealed. At the same time, changes in abundance of recruitment of East Kamchatka walleye pollock are opposite to changes in the mean winter index of the Arctic Oscillation. Thus, the idea of teleconnections in the “atmosphere-ocean” system, the retrospective analysis of the related climatic regimes and prediction of the expected climate changes in one or another region based on this analysis may become a reliable basis for the medium- and long-range forecasting of tendencies of changes in many target species stocks of the Russian fishery.

Keywords: teleconnections in the atmosphere and in the ocean, climatic regime, North Atlantic, North Pacific, East Kamchatka walleye pollock, walleye Pollock of the northern Okhotsk Sea.

REFERENCES

- Vize V. Yu. 1927. Korrelyatsiya mezhdu sostoyaniem meteorologicheskikh ehlementov v udalennykh drug ot druga chastyakh zemnogo shara [Correlations among meteorological characteristics in remote regions of the Earth] // Meteorologicheskij vestnik. No. 11. S. 229–239.
- Elizarov A.A., Rodionov S.N., Kotenev B.N. 1990. Sistemnyj podkhod G.K. Izhevskogo. Soprya-zhennost' kolebanij chislennosti pokolenij treski v Severnoj Atlantike [Connectivity of changes in abundance of cod generations in the North Atlantic] // Plen. dokl. 8-oj Vses. konf. po prom. okeanologii. S. 48–66.
- Izhevskij G.K.  1991. Sistemnaya osnova prognozirovaniya okeanologicheskikh uslovij i vospro-izvodstva promyslovykh ryb [System approach to forecasting of oceanological conditions and reproduction conditions of fish]. M.: Izd-vo VNIRO. 166 s.
- Malinin V.N., Gordeeva S.N. 2009. Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoj chasti Tikhogo okeana

- [Fishery oceanology of the Southeast Pacific]. T. 1. *Izmenchivost' faktorov sredy obitaniya*. SPb: Izd. RGGMU. 278 s.
- Petrosyants M.A., Semenov E.K., Gushchina D. Yu., Sokolikhina E.V., Sokolikhina N.E.* 2005. *Tsirkulyatsiya atmosfery v tropikakh. Klimat i izmenchivost' [Atmospheric circulation in tropics. Climatology and variability]*. M.: MAKSPress. 640 s.
- Barnston A.C., Livezey R.E.* 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weather Rev.* 115. P. 1083–1126.
- Bjornsson H., Venegas S.A.* 1997. A manual for EOF and SVD analyses of climate data. McGill University, CCGCR Report. № 97–1. Montréal, Québec. 52p.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P.* 2003. Recent Shifts in the State of the North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* V. 30 (2183). doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL018597>.
- Chylek P., Lesins. G.* 2008. Multidecadal variability of Atlantic hurricane activity: 1851–2007 // *J. Geophys. Res.* V. 113. № D22106. doi:10.1029/2008JD010036
- Climate Prediction Center — East Atlantic.* Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>
- Climate Prediction Center — Pacific/North American.* Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>
- Climate Prediction Center — Polar/Eurasia.* Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur.shtml>
- Climate Prediction Center — Tropical/Northern Hemisphere/* Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/tnh.shtml>
- Climate Prediction Center — West Pacific/* Accessible via: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>
- Cushing D.H.* 1978. Biological effects of climatic change // *Rapp. P. — v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* V. 173. P. 107–116.
- Cushing D.H.* 1982. *Climate and fisheries*. Academic Press: London. 373 pp.
- Cushing D.H., Dickson R.R.* 1976. The biological Response in the Sea to climatic changes // *Advances in Marine Biology*. V. 14. P. 2–122.
- Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K.M., Franks P.J.S., Chlak K., Miller A.J., McWilliams J.C., Bograd S.J., Arango H., Curchister E., Powell T.M., Riviere P.* 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change // *Geophys. Res. Lett.* V.35. L08607. doi:10.1029/2007GL032838
- Goldenberg S.B., Landsea C.W., Mestas-Nunez A.M., Gray W.M.* 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications // *Science*. V. 293. P. 474–479.
- Jung T., Hilmer M., Ruprecht E., Kleppek S., Gulev S.K., Zolina O.* 2003. Characteristics of the Recent Eastward Shift of Interannual NAO Variability // *J. Climate*. V. 16. P. 3371–3382.
- Helland-Hansen B., Nansen F.* 1920. *Temperature variations in the North Atlantic Ocean and in the atmosphere*. Washington. 243 p.
- Kawasaki T., Omori M.* 1988. Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in mean temperature // *Int. Symp. on Long Term Changes in Marine Fish Populations* / T. Wyatt, M.G. Larrañeta (eds.). Vigo, Spain. P. 273–290.
- Krovnin A.S.* 1995. A Comparative study of climatic changes in the North Pacific and North Atlantic and their relation to the abundance of fish stocks // *Climate change and northern fish populations* / R.J. Beamish (ed.). Can. Spec. Publ. Aquat. Fish. Sci. V. 121. P. 181–198.
- Linkin M., Nigam S.* 2008. The North Pacific Oscillation—West Pacific Teleconnection Pattern: Mature-Phase Structure and Winter Impacts // *J. Climate*. V. 21. P. 1979–1997.
- Lluch-Belda, D., Crawford, R.J.M., Kawasaki, T., MacCall, A.D., Parrish, R.H., Schwartzlose, R.A., Smith, P.* 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science*. V. 8. P. 195–205.
- Lluch-Belda, D., Schwartzlose R.A., Serra R., Parrish, R.H., Kawasaki, T., Hedgecock D., Crawford, R.J.M.* 1992. Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fish. Oceanogr.* V. 1. 339 p.
- Mantua J.N., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C.* 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impact on salmon production // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* V. 78. P. 1069–1079.
- Namias J., Douglas A.V., Cayan D.* 1982. Large-scale changes in North Pacific and North American weather patterns in recent decades. *Mon. Weather Rev.* V. 110. P. 1851–62.
- O'Reilly C.H., Huber L.M., Woollings T., Zanna L.* 2016. The signature of low-frequency oceanic forcing in the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* V. 43. 2810–2818.
- Polovina J.J., Mitchum J.T., Graham N.E., Craig M.P., Demartini E.E., Flint E.* 1994. Physical and biological consequences of a climate event in the central North Pacific // *Fish. Oceanogr.* V.3. № 1. P. 15–21.
- Renwick J.A., Wallace J.M.* 1996. Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Nino, and the PNA pattern // *Mon. Wea. Rev.* V. 124. P. 2071–2076

- Rodionov S.N. 1995. Atmospheric teleconnections and coherent fluctuations in recruitment to North Atlantic cod (*Gadus morhua*) stocks // Climate change and northern fish populations / R.J. Beamish (ed.). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121. P. 45–55.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // Nature. V. 367. P. 723–726.
- Schwartzlose R.A., Alheit J., Bakun A., Baumgartner T., Cloete R., Crawford, R.J.M., Fletcher W.J., Green-Ruiz Y., Nevarez-Martinez M.O., Parrish, R.H., Roy R., Serra R., Shust K.V., Ward N.M., Zuzunaga J.Z. 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations // South African J. of Marine Science. V. 21. 289 p.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophys. Res. Lett. V. 25. P. 1297–1300.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // J. Climate. V. 13. P. 1000–1016.
- Thompson, D.W.J., Wallace J.M. 2001: Regional Climate Impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode // Science. V. 293. P. 85–89.
- Trenberth K. E., Hurrell J.W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Climate Dynamics. V. 9. P. 303–319.
- Trenberth K.E., Branstator W.B., Karoly D., Kumar A., Lau N. — C., Ropelewski C. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures // J. Geophys. Res. V. 5. P. 14291–14324.
- Walker G.T. 1928. World Weather // Memor. Roy. Met. Soc. V. 2. № 17. P. 97–124.
- Walker, G.T., Bliss E.W. 1932. World weather V // Mem. Roy. Meteor. Soc. V. 4. P. 53–84.
- Wallace J.M., Gutzler D.S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // Mon. Weath. Rev. V. 109. P. 784–812.
- Wallace J.M., Smith C., Jiang Q. 1990. Spatial Patterns of Atmosphere-Ocean Interaction in the Northern Winter // J. Climate. V. 3. P. 990–998.
- Wolter K., Timlin M.S. 1998. Measuring the strength of ENSO events — how does 1997/98 rank? // Weather. V. 53. P. 315–324.
- Yu B., Tang Y.M., Zhang X.B., Niitsoo A. 2009. An analysis on observed and simulated PNA associated atmospheric diabatic heating // Clim. Dyn. V. 33(1). P. 75–91

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Correlation patterns between the mean winter (January-March) index of the North Atlantic Oscillation (NAO) and fields of sea level pressure (a) and geopotential heights of the 500 hPa surface (b) in the Northern Hemisphere.

The maps correspond to the positive phase of the NAO.

Fig. 2. Mean winter (January-March) index of the NAO for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.

Fig. 3 Correlation pattern between the mean winter index of the NAO and sea surface temperature anomalies (SSTA) in the North Atlantic and North Pacific in 1950–2018.

Fig. 4 Correlation patterns between the mean winter (January-March) index of the East Atlantic teleconnection pattern (EA) and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–1987 (a) and 1988–2018 (b).

Fig. 5 Mean winter (January-March) index of the EA pattern for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.

Fig. 6. Correlation patterns between the mean winter index of the EA and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–1987 (a) and 1988–2018 (b)

Fig. 7. Mean winter (December-February) index of the Polar/Eurasia teleconnection pattern (POL) for 1951–2018. Thick black line shows 7-year running means.

Fig. 8. Correlation patterns between the mean winter (December-February) index of the POL pattern and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1951–1986 (a) and 1987–2018 (b).

Fig. 9. Correlation patterns between the mean winter index of the POL pattern and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1951–1986 (a) and 1987–2015 (b)

- Fig. 10.** Mean winter (January-March) index of the Scandinavia pattern (SCAND) for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 11.** Correlation patterns between the mean winter (January-March) index of the SCAND and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–1986 (a) and 1987–2018 (b).
- Fig. 12.** Correlation patterns between the mean winter index of the SCAND and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–1986 (a) and 1987–2018 (b)
- Fig. 13.** Mean winter (January-March) index of the East Atlantic/West Russia pattern (EA/WR) for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 14.** Correlation patterns between the mean winter index of the EA/WR pattern and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–1986 (a) and 1987–2018 (b).
- Fig. 15.** Correlation patterns between the mean winter index of the EA/WR pattern and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–1986 (a) and 1987–2018 (b)
- Fig. 16.** Correlation pattern between the mean winter index of the Pacific/North American pattern (PNA) and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–2018
- Fig. 17.** Mean winter (January-March) index of the PNA pattern for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 18.** Correlation pattern between the mean winter index of the PNA pattern and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–2018
- Fig. 19.** Correlation pattern between the mean winter index of the Tropical Northern Hemisphere pattern (TNH) and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1951–2018
- Fig. 20.** Mean winter (December-February) index of the TNH pattern for 1951–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 21.** Correlation pattern between the mean winter index of the TNH pattern and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1987–2018
- Fig. 22.** Correlation pattern between the mean winter index of the West Pacific pattern (WP) and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–2018
- Fig. 23.** Mean winter (January-March) index of the WP pattern for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 24.** Correlation patterns between the mean winter index of the WP pattern and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–1986 (a) and 1987–2018 (b)
- Fig. 25.** Dynamics of the Southern Oscillation (SO) index for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 26.** Correlation pattern between the mean winter (January-April) index of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–2018
- Рис. 27.** Изменения среднего зимнего индекса АМО в 1856–2018 гг. Толстая линия соответствует 7-летнему скользящему осреднению.
- Fig. 28.** Correlation pattern between the AMO index and sea level pressure in the North Atlantic during the winter season (January-March) for 1950–2018.
- Fig. 29.** Correlation pattern between the mean winter (January-April) index of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and SSTA in the North Atlantic and North Pacific for 1950–2018
- Fig. 30.** Correlation pattern between the mean winter (January-April) index of the PDO and geopotential heights of the 500 hPa surface in the Northern Hemisphere for 1950–2018
- Fig. 31.** Mean winter index of the Pacific Decadal Oscillation for 1900–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 32.** Correlation pattern between the mean winter (January-April) index of the North Pacific Gyre Oscillation (NPGO) and mean winter (December-February) sea level pressure in the Northern Hemisphere for 1950–2018
- Fig. 33.** Correlation pattern between the mean winter (January-April) index of the NPGO and SSTA in the North

Atlantic and North Pacific for 1950–2018

- Fig. 34.** Mean winter index of the North Pacific Gyre Oscillation for 1950–2018. Thick black line shows 7-year running means.
- Fig. 35.** Correlation pattern between the recruitment abundance of East Kamchatka walleye pollock at age of 3 years and mean winter (January–April) SSTA in the North Pacific, 1963–2008
- Fig. 36.** 5-year running means of mean winter (December–February) index of the Arctic Oscillation and recruitment abundance of East Kamchatka walleye pollock at age of 3 years
- Fig. 37.** Survival index (SI) anomalies of northern Okhotsk Sea walleye pollock for 1980–2010
- Fig. 38.** Long-term variations of SSTA (January–April) in the Northwest Pacific (region 3P) in 1980–2014. Thick black line shows changes in mean level of temperature anomaly fluctuations between 1980–1998 and 1999–2014.
- Fig. 39.** Correlation pattern between survival index anomalies of northern Okhotsk Sea walleye pollock and winter (February–April) SSTA field in the North Pacific, 1980–2010
- Fig. 40.** Correlation patterns between: mean winter NPGO index and SSTA field (a); time series of survival index and SSTA field in the North Pacific with time lag = –2 years; February–April, 1980–2010
- Fig. 41.** Cumulative sums of anomalies of the survival index and NPGO index (February–April) for 1980–2010. The NPGO index leads the SI time series by 2 years.