

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

УДК 639.2.053.1639.239

Влияние крупномасштабных климатических факторов
на динамику запаса тихоокеанской сайры

А.С. Кровнин, С.П. Мельников, Д.В. Артеменков, Г.П. Мурый, А.И. Никитенко

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

Тихоокеанская сайра *Cololabis saira* является одним из наиболее массовых пелагических видов рыб в северной части Тихого океана. Динамика её уловов и вылова на усилии в 1950–2015 гг. характеризовалась хорошо выраженной квазидекадной изменчивостью, связанной с крупномасштабными климатическими процессами в Северо-Тихоокеанском регионе. Отмечена статистически значимая противофазная зависимость ($r = -0,45$; $p = 0,03$) между временными рядами вылова на усилии (CPUE) и среднего зимнего (январь-апрель) индекса осцилляции Северо-Тихоокеанских круговоротов (ОСТК) при нулевом сдвиге. Проведённый анализ выявил также статистически значимую связь ($r = 0,68$; $p = 0,0009$) между CPUE и зимним индексом ОСТК в 1994–2016 гг., когда временной ряд индекса сдвинут на 5 лет вперёд относительно временного ряда вылова на усилии. Вылов на усилии возрастал с потеплением поверхностных вод к востоку и северо-востоку от Японии. Этот пятилетний временной сдвиг, очевидно, связан с распространением волн Россби, генерируемых системой «северотихоокеанское колебание/ОСТК», из восточной и центральной частей Северной Пацифики на запад. Эти волны достигают её западной границы и модулируют декадные колебания в системе течений Куро-Оясио. Вместе с тем, уловы сайры в 1950–1993 гг. не обнаружили статистически значимой связи с индексом ОСТК при сдвигах от 0 до 5 лет. Необходимы дальнейшие исследования влияния климата на динамику численности тихоокеанской сайры с привлечением дополнительных биологических, промысловых и климатических данных. Это позволит вплотную подойти к разработке прогноза состояния запаса сайры с учётом крупномасштабных климатических процессов в северной части Тихого океана.

Ключевые слова: тихоокеанская сайра *Cololabis saira*, климатическая изменчивость, осцилляция Северо-Тихоокеанских круговоротов, температура поверхности океана, уловы, вылов на усилии.

ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанская сайра *Cololabis saira* (Brevoort, 1856) является одним из наиболее массовых пелагических видов рыб в северной части Тихого океана. Она широко распределяется от Азиатского побережья до Американского на глубине до 230 м с предпочтительной

температурой воды от 15 до 18 °С [Парин, 1960, 1968; Odate, 1977; Eschmeyer et al., 1983; Kosaka, 2000; Беляев, 2003; Ito et al., 2004]. Сайра относится к короткоцикловым видам, продолжительность жизни которой составляет около двух лет. Обладая высоким темпом роста, уже в возрасте полугода дли-

на сайры превышает 20 см, достигая к концу второго года жизни 38–40 см [Байталюк, 2004; Suyama, 1996 a, b]. Основные районы воспроизводства сайры расположены в северо-западной части океана у тихоокеанского побережья японских островов Хонсю, Кюсю и Сикоку, в открытых водах — в районах подводных возвышенностей. Географическое положение нерестилищ связано с динамикой океанологических условий и положения вихревых структур [Байталюк, 2004]. Нерест рыб различной интенсивности протекает практически в течение всего года с пиками в зимне-весенний и весенне-летний периоды. На протяжении всего жизненного цикла сайры совершает протяжённые нагульные и нерестовые миграции в широтном и долготном направлениях. Мощность миграционных потоков определяется спецификой океанологического режима районов обитания сайры и варьирует в значительных пределах в разные годы [Fukushima, 1979; Watanabe, 1997; Baitaliuk et al., 2013; Антоненко, Новиков, 2017].

Сайра является важным объектом международного специализированного промысла, который наиболее интенсивно начал развиваться со второй половины XX века. До конца прошлого столетия ежегодный вылов колебался

в пределах 200–400 тыс. т (рис. 1). С начала 2000-х гг. уловы сайры возросли в 1,5–2 раза, достигнув исторического максимума 630 тыс. т в 2014 г. После этого, вследствие перелова, произошло резкое падение вылова сайры, который в 2017 г. составил 265 тыс. т. Основным промысел сайры судами Российской Федерации приходится на тихоокеанские воды южных Курильских островов в пределах собственной исключительной экономической зоны (ИЭЗ). Большая часть вылова Японии приходится на свою ИЭЗ. Также японские суда в соответствии с двусторонними договорённостями ведут промысел сайры в ИЭЗ России. В открытом море северной части Тихого океана облов скоплений сайры осуществляют помимо России и Японии суда Тайваня, Китая, Южной Кореи и Вануату.

Понимание механизма колебания уровня запасов (численности и биомассы) морских видов рыб является ключевым элементом при разработке мер управления и прогнозирования рыболовства. По мнению многих исследователей, динамика численности пелагических рыб напрямую или косвенно связана с изменчивостью океанологических и климатических процессов в Мировом океане [Sinclair, Tremblay, 1985; Mantua et al., 1997; Beamish et al., 1999

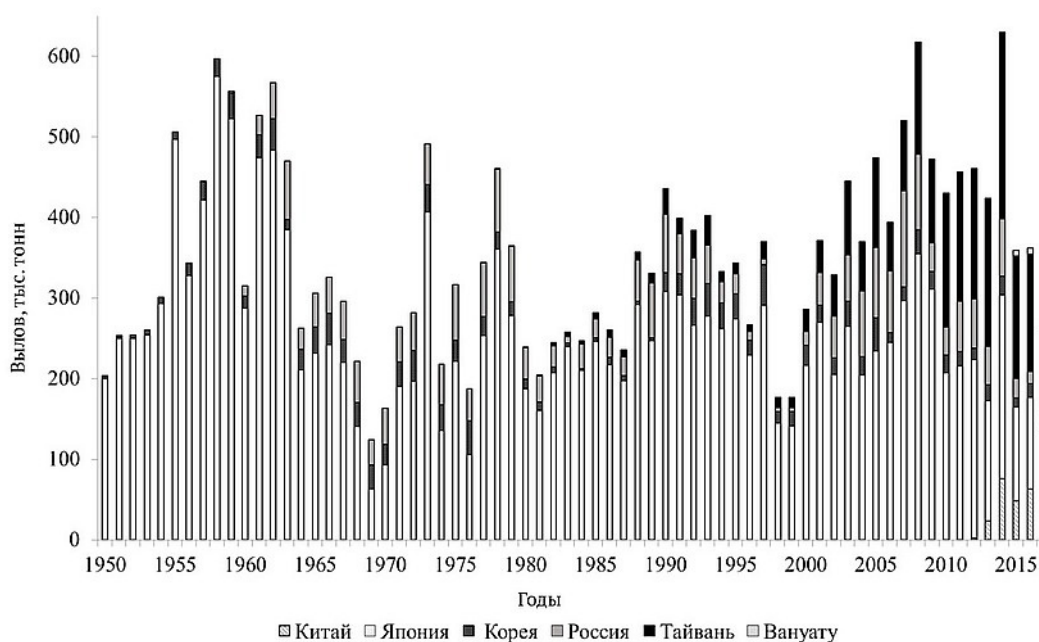


Рис. 1. Международный вылов тихоокеанской сайры в 1950–2017 гг.

]. Проведённые в последнее время исследования выявили декадные колебания в системе «атмосфера-океан» в Северо-Тихоокеанском регионе [Trenberth, Hurrell, 1995; Nakamura et al., 1997; Minobe, Mantua, 1999]. Существует целый ряд публикаций, в которых их авторы анализировали связь между колебаниями запаса сайры и климатической изменчивостью. Исследователи пришли к заключению, что во многих случаях динамика численности сайры определяется влиянием океанологических условий на воспроизводство ее поколений и на условия выживаемости в период раннего онтогенеза, а не только степенью промышленного воздействия [Matsumiya, Tanaka, 1978; Takahashi, 1997; Ebisawa, Sunou, 1999; Kosaka, 2000; Gong, Suh, 2004; Tian et al., 2002, 2003, 2004]. По результатам исследований тайваньских специалистов установлено, что температура поверхности океана (положение изотермы 15 °C) в условиях наблюдаемой климатической изменчивости в Северо-Западной Пацифике является ключевым фактором в эффективном прогнозировании потенциальных мест пространственного распределения скоплений сайры [Tseng et al., 2011].

Поскольку сайра принадлежит к ихтиоцену пелагиали зоны течения Куроисио, распределение кормовых организмов, пищевая конкуренция и хищничество в качестве биотических факторов в отдельные периоды могут оказывать влияние на ее урожайность и численность, что также отмечено в работах многих исследователей [Fukushima, 1979; Свирский, Иванов, 1984; Беляев, Соколовская, 1988; Беляев и др., 1991; Беляев, 2003].

Таким образом, резюмируя вышесказанное, проведенные в последние десятилетия исследования показали, что динамика запаса тихоокеанской сайры тесно связана с изменчивостью целого ряда абиотических и биотических факторов. Однако степень влияния различных факторов на динамику запаса сайры может варьировать значительно во времени из-за широкомасштабных климатических изменений в Северо-Тихоокеанском регионе. В этой связи целью данной работы является рассмотрение роли крупномасштабных климатических факторов в динамике запаса тихоокеанской сайры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Средняя зимняя (январь—апрель) температура поверхности океана (ТПО) в узлах 2-градусной регулярной сетки рассчитана на основе среднемесячных данных из Расширенного реконструированного массива температуры поверхности океана (ERSST) версии 3b. Средние зимние (декабрь—февраль) значения геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа рассчитаны на основе среднемесячных данных, содержащихся в массиве NCEP/NCAR Reanalysis 1 [Kalnay et al., 1996; Smith et al., 2008; ESRL, 2018].

Аномалии ТПО (АТПО) и высот изобарической поверхности 500 гПа рассчитаны относительно базового периода 1981—2010 гг. При расчётах среднесезонных значений и их аномалий использована программа Climate Data Operators [CDO 2018, 2018].

Средние зимние значения индекса осцилляции Северо-Тихоокеанских круговоротов (ОСТК) [Di Lorenzo et al., 2008] рассчитаны на основе его среднемесячных значений [NPGO, 2018].

Индекс ОСТК представляет собой главную компоненту, т. е. временной ряд второй эмпирической ортогональной функции (ЭОФ2) поля аномалий динамических высот уровня моря в районе 180°–110° з. д. и 25°–62° с. ш. Учитывая, что аномалии динамических высот отражают изменения геострофической циркуляции, предложенный индекс характеризует интенсивность субарктического и субтропического океанических круговоротов Северной Пацифики. В периоды положительной фазы ОСТК происходит усиление циркуляции в обоих круговоротах.

В работе использованы климатические данные за период 1950—2016 гг.

Данные по уловам и вылову на усилие (CPUE, т/час траления) тихоокеанской сайры взяты из отчёта 3-ей встречи Малого научного комитета по тихоокеанской сайре Научного Комитета Комиссии по рыболовству в северной части Тихого океана, состоявшейся 13–16 апреля 2018 г. в г. Токио, Япония [Report of the Small ..., 2018]. Поскольку наиболее длинный временной ряд уловов сайры принадлежит Японии и хорошо коррелирует с временным рядом международных уловов

(0,74), для анализа были использованы вышеуказанные промысловые показатели японских судов в 1950–2016 гг. При этом данные по вылову на усилие были доступны только за период 1994–2016 гг. Период 1950–1993 гг. был проанализирован по данным уловов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, динамика вылова тихоокеанской сайры характеризуется квазидекадной изменчивостью с периодом 15–18 лет. Максимумы вылова отмечались в конце 1950-х, середине 1970-х, в начале 1990-х и в конце 2000-х гг. (см. рис. 1) Колебания такого временного масштаба характерны для климатической системы всего Северного полушария. При этом в его высоких широтах квазидекадную изменчивость часто связывают с Арктическим колебанием (АК) [Thompson and Wallace, 1998; Xie et al., 1999]. В Северо-Тихоокеанском регионе АК, в частности, отвечает за квазидекадные колебания ТПО в северной части Японского моря и в районе Субполярного фронта.

В работе [Кровнин и др., 2017] показано, что Арктическое колебание в значительной мере определяет состояние атмосферного Северо-Тихоокеанского колебания с временным лагом 1–2 года и, в итоге, фазу тесно связанной с ним осцилляции Северо-Тихоокеанских круговоротов. Прежде всего, это проявляется в поле АТПО в Северной Пацифике. Существует хорошая связь индекса ОСТК с колебаниями температуры и солёности в Восточной Пацифике [Di Lorenzo et al., 2008]. Однако проведённые в ФГБНУ «ВНИРО» исследования показали тесную связь индекса ОСТК с квазидекадными колебаниями температуры воды в Северо-Западной Пацифике и пополнением таких промысловых рыб, как северохотоморский минтай, тихоокеанская треска северо-западной части Берингова моря и западно-камчатская горбуша [Кровнин и др., 2017, 2018; Krovnin, Klovach, 2012]. Можно предположить, что аналогичная связь с указанным климатическим параметром имеется и для колебаний запаса сайры.

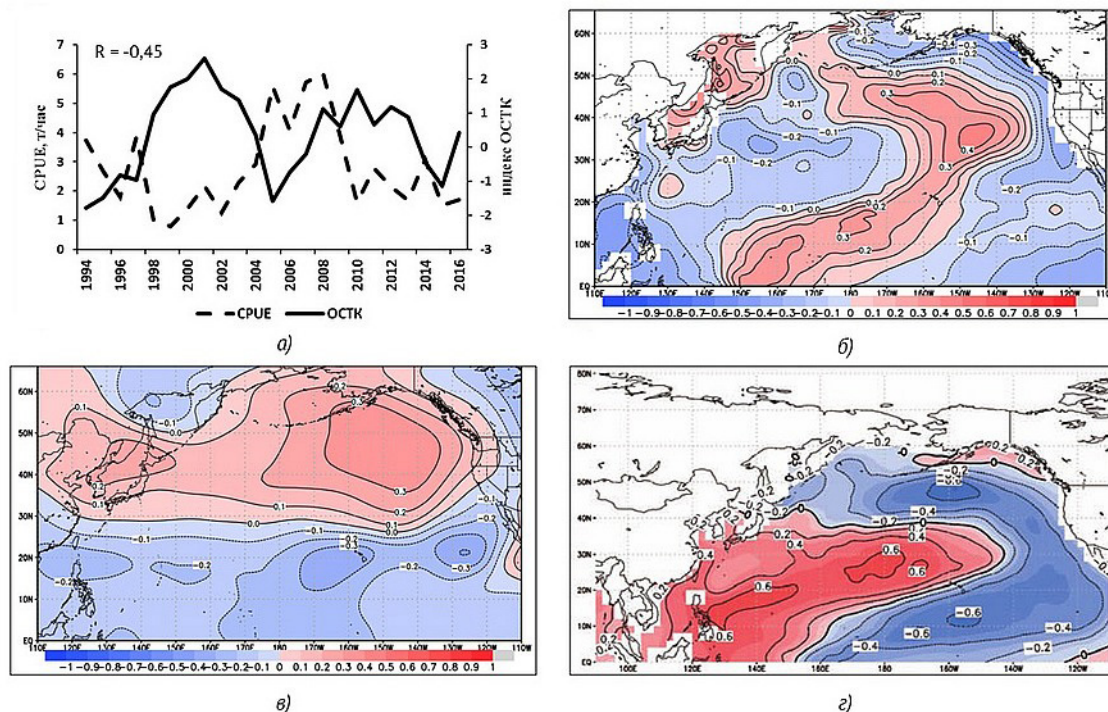


Рис. 2. Связь вылова на усилие с климатическими факторами при нулевом сдвиге за период 1994–2016 гг.: изменения среднего зимнего (январь–апрель) индекса ОСТК и CPUE (а); распределение коэффициентов корреляции между временным рядом CPUE и полями средних зимних аномалий ТПО (б) и геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (в); распределение коэффициентов корреляции между временным рядом индекса ОСТК и полем АТПО (г) в Северной Пацифике

На рис. 2 а показаны временные ряды уловов на усилие и индекса ОСТК с 1994 г. по 2016 г. На протяжении практически всего рассматриваемого периода хорошо прослеживалась противофазность в изменениях обеих характеристик. Однако в 2014–2016 гг. отмечалось синхронное изменение СРУЕ и индекса ОСТК. В целом в 1994–2016 гг. коэффициент корреляции составил $r = -0,45$ ($p = 0,03$). Можно предположить, что нарушение противофазности после 2014 г. было связано с резким потеплением вод на северо-востоке Тихого океана и его постепенным распространением на запад к восточному побережью Камчатки и далее в район Северных и Центральных Курил [Кровнин и др., 2016]. Это обусловило смещение районов промысла пелагических видов рыб, включая сайру, в северном направлении. Одновременно с этим произошло снижение вылова на усилие и падение уловов сайры в традиционных районах японского промысла [Suyama et al., 2018]. Однако поля корреляции между временным

рядом СРУЕ и средними зимними АТПО, а также аномалиями геопотенциальных высот поверхности 500 гПа северной части Тихого океана (рис. 2 б, в) показывают слабое соответствие пространственной структуре ОСТК (рис. 2 г). Смещение временного ряда СРУЕ на 1–2 года назад не показало существенного увеличения корреляции. Отмеченная противофазность очевидно связана с известным фактом, что успешность нереста сайры связана с интенсивностью Курошио: при его ослаблении (снижение индекса ОСТК) создаются более благоприятные условия для воспроизводства [Беляев, 2003].

Дальнейший анализ временных рядов СРУЕ и среднезимнего индекса ОСТК выявил статистически значимую положительную корреляционную связь с $r = 0,68$ ($p = 0,0009$) между ними, когда временной ряд индекса ОСТК сдвинут на 5 лет вперёд относительно временного ряда СРУЕ (рис. 3). При таком временном сдвиге значение индекса ОСТК зимой 1989 г. поставлено

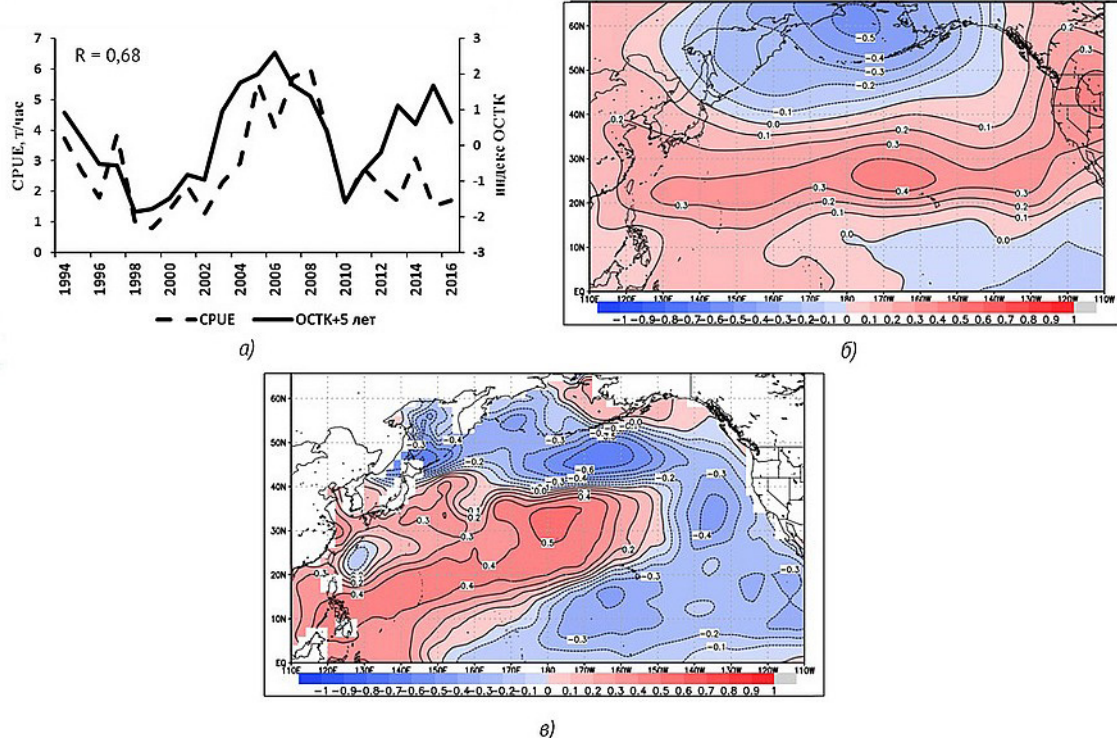


Рис. 3. Связь вылова на усилие с климатическими факторами при их сдвиге на 5 лет вперёд за период 1994–2016 гг.: изменения среднего зимнего (январь–апрель) индекса ОСТК и СРУЕ (а); распределение коэффициентов корреляции между временным рядом СРУЕ и полями средних зимних аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) и ТПО (в) в Северной Пацифике

в соответствие показателю CPUE в 1994 г. и т. д. При указанном сдвиге наблюдается заметное соответствие корреляционных полей между CPUE и климатическими характеристиками (АТПО и Н500) пространственной структуре ОСТК. Так, на карте корреляции для геопотенциальных высот (рис. 3 б) хорошо прослеживается атмосферный диполь с центром отрицательных значений коэффициентов корреляции (до -0,58) над северной частью Берингова моря и областью противоположных корреляций (до 0,45) над субтропическими широтами океана. Этот диполь довольно хорошо соответствует Север-Тихоокеанскому колебанию (СТК) в его положительной фазе.

Распределение коэффициентов корреляции между временным рядом CPUE и полем средних зимних АТПО в северной части Тихого океана при указанном сдвиге 5 лет вперёд (рис. 3 в) обладает большим сходством со структурой поля корреляции между индексом ОСТК и теми же самыми рядами температурных аномалий (рис. 2 г). Таким образом, полученные результаты подтверждают наличие статистической связи между уловом на усилии и зимним индексом ОСТК, когда изменения в климатической системе Северо-Тихоокеанского региона опережают изменения в показателях промысла сайры на 5 лет.

Одним из объяснений наблюдаемого феномена (5-летний сдвиг зависимости между

изменчивостью климатических характеристик и показателями промысла тихоокеанской сайры) может быть следующее. Как было установлено ранее, аномалии уровня поверхности моря, связанные с СТК/ОСТК, генерируют распространяющиеся в западном направлении волны Россби из восточной и центральной частей Северной Пацифики [Taguchi et al., 2007; Ceballos et al., 2009]. Эти волны достигают западных границ океана спустя 3–4 года и модулируют декадную изменчивость температуры воды в районе течений Оясио и Куроисио. Оставшаяся часть сдвига (1–2 года) может быть связана с периодом адаптации популяции сайры к изменениям среды её обитания. В частности, аналогичный сдвиг в 2 года между численностью пополнения минтая северной части Охотского моря и средним зимним индексом ОСТК выявлен в работе [Кровнин и др., 2018].

Для периода до 1993 г. были использованы данные по японским уловам сайры. Для этого периода были рассчитаны такие же поля корреляции, как и в случае с CPUE со сдвигами от 0 до 5 лет. Наибольшие (и при этом статистически значимые для поля АТПО) абсолютные значения коэффициентов корреляции также были отмечены при сдвиге в 5 лет. При этом, распределение коэффициентов корреляции между японскими уловами и полем средних зимних АТПО при его сдвиге на 5 лет вперёд в 1950–1993 гг., в целом, сходно

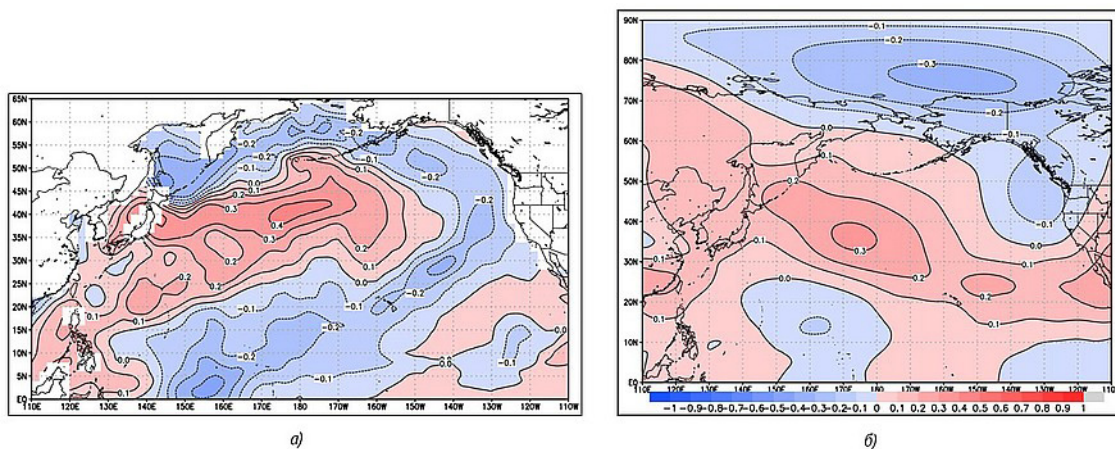


Рис. 4. Связь уловов сайры с климатическими факторами при их сдвиге на 5 лет вперёд за период 1950–1993 гг.: распределение коэффициентов корреляции между временным рядом уловов и полями средних зимних аномалий ТПО (а) и геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) в Северной Пацифике

с таковым, полученным для CPUE за период 1994–2016 гг. (рис. 4 а).

Можно предположить, что отмечаемый 5-ти летний сдвиг также объясняется временем распространения волн Россби из восточной / центральной частей Северной Пацифики до её западной границы и периодом адаптации популяции сайры к изменениям условий среды обитания. Однако, область положительных корреляций до 1993 г. была расположена севернее на $10\text{--}15^\circ$ в сравнении с последующим периодом (1994–2016 гг.). Центры СТК в период до начала 1990-х годов также были смещены к северу примерно на 15 градусов (рис. 4 б). Очевидно, широтные различия в положении района с высокой положительной корреляцией между двумя периодами были связаны с изменением климатического режима в Северной Пацифике в конце 1980-х годов [Yeh et al., 2011].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика уловов и вылова на усилие тихоокеанской сайры в 1950–2016 гг. характеризовалась хорошо выраженной квазидекадной изменчивостью, связанной с крупномасштабными климатическими процессами в Северо-Тихоокеанском регионе.

Отмечена значимая противофазная зависимость ($r = -0,45$; $p = 0,03$) между временными рядами CPUE и среднего зимнего (январь–апрель) индекса ОСТК при нулевом сдвиге. Это можно объяснить тем, что успех нереста сайры во многом зависит от интенсивности Куро-Ойясио, которая в данной работе выражена через индекс ОСТК.

Проведённый анализ выявил связь между CPUE и зимним индексом ОСТК в 1994–2016 гг. ($r = 0,68$; $p = 0,0009$), когда временной ряд индекса сдвинут на 5 лет вперёд относительно временного ряда вылова на усилие. Эта связь отражает влияние крупномасштабной изменчивости климатических процессов в северной части Тихого океана на состояние запасов сайры. Полученный пятилетний временной сдвиг, очевидно, связан с распространением волн Россби, генерируемых СТК / ОСТК, из восточной и центральной частей Северной Пацифики на запад, которые достигают её западной границы и модулируют

декадные колебания в системе течений Куро-Ойясио.

Уловы сайры в 1950–1993 гг. не обнаружили статистически значимой связи с индексом ОСТК при сдвигах от 0 до 5 лет. Однако структура поля корреляции уловов сайры и зимних АТПО при сдвиге их временных рядов на 5 лет вперёд обладала определённым сходством с аналогичным полем корреляции для CPUE. При этом область значимых положительных корреляций до 1993 г. была расположена на $10\text{--}15^\circ$ севернее по сравнению с периодом после 1993 г.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости продолжения дальнейших исследований влияния климата на динамику численности тихоокеанской сайры с привлечением дополнительных биологических, промысловых и климатических данных. Это позволит вплотную подойти к разработке прогноза состояния запаса сайры с учётом крупномасштабных климатических процессов в северной части Тихого океана.

ЛИТЕРАТУРА

- Антоненко Д.В., Новиков Ю.В. 2017. О нагульных миграциях сайры в северо-западной части Тихого океана // Известия ТИНРО. Т. 188. С. 115–124.
- Байтальюк А.А. 2004. Тихоокеанская сайра (*Cololabis saira*): размерно-возрастная структура, особенности воспроизводства, динамика численности сезонных и региональных группировок. Дисс. ... канд. биол. наук. Владивосток. 179 с.
- Беляев В.А. 2003. Экосистема зоны течения Куро-Ойясио и её динамика. Хабаровск: Хабаровское книжное издательство. 382 с.
- Беляев В.А., Новиков Ю.В., Свирский В.Г. 1991. Запасы дальневосточной сардины и изменения в ихтиоценое СЗТО // Рыбное хозяйство. № 8. С. 24–27.
- Беляев В.А., Соколовская Т.Г. 1988. Ихтиопланктон системы течения Куро-Ойясио как индикатор состояния ихтиоценоза // Тез. докл. 4-й Всес. конф. по раннему онтогенезу рыб. Москва. Ч. 2. С. 103–105.
- Кровнин А.С., Котенев Б.Н., Кловач Н.В. 2016. Связь «лососевых эпох» в дальневосточном регионе с крупномасштабными изменениями климата в Северной Пацифике // Труды ВНИРО. Т. 164. С. 22–40.
- Кровнин А.С., Антонов Н.П., Котенев Б.Н., Мурый Г.П. 2017. Влияние климата на квазидекадные изменения численности поколений северо-западной

- трески Берингова моря // Труды ВНИРО. Т. 169. С. 37–50.
- Кровнин А.С., Котенев Б.Н., Мордасова Н.В., Мурый Г.П. 2018. Дальние связи в атмосфере и океане как основа долгосрочного рыбопромыслового прогнозирования // Труды ВНИРО. Т. 173. С. ...
- Парин Н.В. 1960. Ареал сайры (*Cololabis saira* Br. — Scomberesocidae, Pisces) и значение океанографических факторов для её распределения // ДАН СССР. Т. 130. № 3. С. 649–652.
- Парин Н.В. 1968. Ихтиофауна океанской эпипелагиали. М.: Наука. 186 с.
- Свирский В.Г., Иванов П.П. 1984. Выедание личинок сайры дальневосточной сардиной // Биология моря. № 4. С. 67–69.
- Baitaliuk A.A., Orlov A.M., Ermakov Yu.K. 2013. Characteristic features of ecology of the Pacific saury *Cololabis saira* (Scomberesocidae, Beloniformes) in open waters and in the northeast Pacific Ocean // J. Ichthyol. V. 53. № 11. P. 899–913.
- Beamish, R.J., Noakes, D.J., McFarlane, G.A., Klyashotin, L., Ivanov, V.V., Kurashov, V. 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon // Can. J. Fish. Aquat. Sci. V.56. P. 516–526.
- Ceballos L.I., Di Lorenzo E., Hoyos C.D., Schneider N., Taguchi B. 2009. North Pacific Gyre Oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems // J. Climate. V. 22. P. 5163–5174. doi: 10.1175/2009JCLI2848.1.
- CDO 2018 — Climate Data Operators. Accessible via: <http://www.mpimet.mpg.de/cdo>. 01.08.2018.
- Di Lorenzo, E., Schneider N., Cobb K.M., Franks J.S., Chhak K., Miller A.J., McWilliams J., Bograd S.J., Arango H., Curchitser E., Powell T.M., Riviere P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change // Geophys. Res. Lett. 35, L08607. doi: 10.1029/2007GL032838.
- Ebisawa, Y., Sunou, H. 1999. Influence of variation of the Kuroshio water on catch fluctuations of saury, *Cololabis saira*, in the waters off northeastern Japan // Bull. Ibaraki Pref. Fish Exp. Stn. 37. P. 29–36 (in Japanese).
- ESRL — NOAA Earth System Research Laboratory's Physical Sciences Division. Accessible via: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. 01.08.2018.).
- Eschmeyer W.N., Herald E.S., Hammann H. 1983. A Field Guide to Pacific Coast Fishes of North America. Houghton Mifflin Company, Boston, MA. 336 pp.
- Fukushima, S. 1979. Synoptic analysis of migration and fishing conditions of saury in the northwestern Pacific Ocean // Bull. Tohoku. Reg. Fish. Res. Lab. V. 41. P. 1–70 (in Japanese with English abstract).
- Gong Y., Suh Y.S. 2004. Effect of environmental conditions on the stock structure and abundance of the Pacific saury, *Cololabis saira* in the Tsushima Warm Current region // J. Environ. Sci. V. 13. P. 449–467.
- Ito S., Kishi M.J., Kurita K., Oozeki Y., Yamanaka T., Megrey B.A., Werner F.E. 2004. Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model // Fisheries Oceanography. V. 13 (Suppl. 1). P. 111–124. doi: 10.1111/j.1365–2419.2004.00307.x.
- Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, D. Joseph. 1996: The NCEP/NCAR40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 77. P. 437–471.
- Kosaka S. 2000. Life history of Pacific saury *Cololabis saira* find consideration of resource fluctuation based on it // Bull. Tohoku Nat. Fish. Res. Inst. № 63. P. 1–96.
- Krovnin A.S., Klovach N.V. 2012. The Association of Long-Term Changes in West Kamchatka Pink Salmon Catches with Climate Regime Shifts in the Northern Hemisphere // North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report No. 8. P. 126–129.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // Bull. Am. Meteor. Soc. V. 78. P. 1069–1079.
- Matsumiya, Y., Tanaka, S. 1978. Dynamics of the saury population in the Pacific Ocean off northern Japan. III. Reproductive relations of large and medium sized fish // Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish. V.44. P. 451–455.
- Minobe, S., Mantua, N. 1999. Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific // Prog. Oceanogr. V.43. P. 163–192. doi: 10.1016/S0079–6611(99)00008–7.
- Nakamura, H., Lin, G., Yamagawa, T. 1997. Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades // Bull. Am. Meteor. Soc. V. 78. P. 2215–2225.
- NPGO — North Pacific Gyre Oscillation. Accessible via: <http://www.o3d.org/npgo/> 01.08.2018.
- Odate S. 1977. On the distribution of Pacific saury in the North Pacific Ocean // Res. Inst. North Pac. Fish. Fac. Fish. Hokkaido Univ. Spec. Vol. P. 353–381.
- Report of the Small Scientific on Pacific Saury. 2018 // North Pacific Fisheries Commission. SSC PS03. 29 pp.
- Sinclair, M., Tremblay, M.J. 1985. El Niño events and variability in a Pacific mackerel (*Scomber japonicus*)

- survival index: support for Hjort's second hypothesis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 42. P. 602–608.
- Smith T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, Lawrimore J. 2008: Improvements NOAA's Historical Merged Land–Ocean Temp Analysis (1880–2006) // *J. of Climate*. V. 21. P. 2283–2296.
- Suyama S., Kidokoro H., Naya M., Hashimoto M., Vijai D. 2018. Standardization of CPUE data of Pacific saury (*Cololabis saira*) caught by the Japanese stick-held dip net fishery during 1994 to 2017 // *North Pacific Fisheries Commission. SSC PS03. WP 05*. 25 pp.
- Suyama S., Sakurai Y., Shimazaki K. 1996 a. Age and growth of pacific saury *Cololabis saira*, in the western Pacific ocean estimated from daily otolith growth increments // *Fish. Science*. № 62 (1). P. 1–7.
- Suyama S., Sakurai Y., Shimazaki K. 1996 b. Maturation and age in days of Pacific saury *Cololabis saira* in the central North Pacific Ocean during the summer // *Nippon Suisan Gakkaishi*. № 62 (3). P. 361–369.
- Taguchi, B., S.P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai. 2007: Decadal variability of the Kuroshio extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast // *J. Climate*. V. 20. P. 2357–2377.
- Takahashi, Y. 1997. Long-term cycle of catch of Pacific saury stock // *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.* V. 61. P. 92–94.
- 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.
- Tian Y., Akamine T., Suda M. 2003. Variations in the abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*) from the northwestern Pacific in relation to oceanic-climate changes // *Fish. Res.* V. 60. P. 439–454.
- Tian Y., Akamine T., Suda M. 2002. Long-term variability in the abundance of Pacific saury in the northwestern Pacific ocean and climate changes during the last century // *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.* V. 66. P. 16–25 (in Japanese with English abstract).
- Tian Y., Ueno Y., Suda M., Kamine T. 2004. Decadal variability in the abundance of Pacific saury and its response to climatic/oceanic regime shifts in the northwestern subtropical Pacific during the last half century // *J. of Marine Systems*. V. 52. P. 235–257. doi: 10.1016/j.jmarsys.2004.04.004.
- Trenberth K.E., Hurrell J.W. 1995. Decadal coupled atmosphere–ocean variations in the North Pacific Ocean // *Climate Changes and Northern Fish Populations* / Beamish, R.J. (Ed.). *Can. Spec. Pub. Fish. Aquat. Sci.* No. 121. P. 15–24.
- Tseng C-T., Sun C-L., Yeh S-Z., Chen S-C., Su W-C., Liu D-C. 2011. Influence of climate-driven sea surface temperature increase on potential habitats of the Pacific saury (*Cololabis saira*) // *ICES J. of Marine Science*. V. 68. P. 1105–1113. doi: 10.1093/icesjms/fsr070.
- Watanabe, Y., Oozeki, Y., Kitagawa, D. 1997. Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1067–1076. doi: 10.1139/f97–013.
- Xie S-P, Noguchi H, Matsumura S. 1999. A hemispheric-scale quasi-decadal oscillation and its signature in Northern Japan // *J. of the Meteorological Society of Japan*. V.77. P. 573–582.
- Yeh S-W., Kang Y-J., Noh Y., Miller A.J. 2011. The North Pacific Climate Transitions of the Winters of 1976/77 and 1988/89 // *J. of Climate*. V. 24. P. 1170–1183.

Поступила в редакцию 02.09.2018 г.

Принята после рецензии 06.09.2018 г.

Aquatic biological resources

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

**Impact of the large-scale climatic factors on
dynamics of pacific saury stock**

A.S. Krovnin, S.P. Melnikov, D.V. Artemenkov, G.P. Moury, A.I. Nikitenko

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

The Pacific saury *Cololabis saira* is among the most abundant pelagic fish species in the North Pacific. During 1950–2016 the dynamics of its catch and catch per unit effort (CPUE) has been characterized by the well-expressed quasi-decadal variability associated with the large-scale climatic processes in the North Pacific region. There was a quite good opposite relationship ($r = -0.45$; $p=0.03$) between time series of CPUE and mean winter (January–April) index of the North Pacific Gyre Oscillation (NPGO) at zero lag. The analysis revealed also a close relationship ($r = 0.68$; $p=0.0009$) between CPUE and winter NPGO index for 1994–2016 when the time series of the index was shifted by 5 years ahead relative to the CPUE time series. Catch per unit effort increased with warming of surface water east and northeast of Japan. The 5-year time lag was obviously associated with westward propagation of Rossby waves generated by the North Pacific Oscillation/NPGO system in the eastern and central North Pacific, which reached its western boundary and modulated decadal variations in the Kuroshio-Oyashio Current system. At the same time, saury catches in 1950–1993 did not reveal statistically significant relationship with the NPGO index at time lags from 0 to 5 years. Further research of climate impact on abundance dynamics of Pacific saury are needed, using additional biological, fishery and climatic data. It will allow for developing forecasts of saury stock state, with account of the large-scale climatic processes in the North Pacific.

Keywords: Pacific saury, climatic variability, North Pacific Gyre Oscillation, sea surface temperature, catch, catch per unit effort.

REFERENCES

- Antonenko D.V., Novikov Yu.V. 2017. O nagul'nyh migratsiyah sajry v severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana [On feeding migrations of Pacific saury in the Northwest Pacific] // Izvestiya TINRO. T. 188. S. 115–124.*
- Bajtalyuk A.A. 2004. Tihookeanskaya sajra (Cololabis saira): razmerno-vozrastnaya struktura, osobennosti proizvodstva, dinamika chislennosti sezonnyh i regional'nyh gruppировок [Pacific saury (Cololabis saira): reproduction features, abundance dynamics of seasonal and regional aggregations]. Diss. ... kand. biol. nauk. Vladivostok. 179 s.*
- Belyaev V.A. 2003. Ehkosistema zony techeniya Kuroshio i ee dinamika [Ecosystem of Kuroshio zone and its dynamics]. Habarovsk: Habarovskoe knizhnoe izdatel'stvo. 382 s.*
- Belyaev V.A., Novikov Yu.V., Svirskij V.G. 1991. Zapasy dal'nevostochnoj sardiny i izmeneniya v ihtiocene SZTO [Far East sardine stocks and changes in ichthyocen of the Northwest Pacific// Rybnoe hoz-vo. № 8. S. 24–27.*
- Belyaev V.A., Sokolovskaya T.G. 1988. Ihtioplankton sistemy techeniya Kuroshio kak indikator sostoyaniya ihtiocena [Ichthyoplankton of the Kuroshio Current system as an indicator of ichthyocen state]// Tez. dokl.*

- 4-j Vses. konf. po rannemu ontogenezu ryb. Moskva. Ch. 2. S. 103–105.
- Krovnin A.S., Kotenev B.N., Klovach N.V. 2016. Svyaz' "lososevyh ehposh" v dal'nevostochnom regione s krupnomasshtabnymi izmeneniyami klimata v Severnoj Pacifike [Association of «salmon epochs» in the Far East region with the large-scale climate variations in the North Pacific] // Trudy VNIRO. T. 164. S. 22–40.
- Krovnin A.S., Antonov N.P., Kotenev B.N., Murj G.P. 2017. Vliyaniye klimata na kvazidekadnye izmeneniya chislennosti pokolenij severo-zapadnoj treski Beringova morya [Climate effects on quasi-decadal changes in recruitment of Pacific cod in the northwestern Bering Sea] // Trudy VNIRO. T. 169. S. 37–50.
- Krovnin A.S., Kotenev B.N., Mordasova N.V., Murj G.P. 2018. Dal'nie svyazi v atmosfere i okeane kak osnova dolgosrochnogo rybopromyslovogo prognozirovaniya [Teleconnections in the atmosphere and ocean as a basis of the long-range fishery forecasting] // Trudy VNIRO. T. 173. S. ...
- Parin N.V. 1960. Areal sajry (*Cololabis saira* Br. — Scomberesocidae, Pisces) i znachenie okeanograficheskikh faktorov dlya ee raspredeleniya [Area of Pacific saury (*Cololabis saira* Br. — Scomberesocidae, Pisces) and importance of oceanographic factors for its distribution] // DAN SSSR. T. 130. № 3. S. 649–652.
- Parin N.V. 1968. Ihtiofuna okeanskoj ehpipegialii [Ichthyofauna of oceanic epipelagial]. M.: Nauka. 186 s.
- Svirskij V.G., Ivanov P.P. 1984. Vyedanie lichinok sajry dal'nevostochnoj sardinoj [Consumption of Pacific saury larvae by Far East sardine] // Biol. morya. № 4. S. 67–69.
- Baitaliuk A.A., Orlov A.M., Ermakov Yu.K. 2013. Characteristic features of ecology of the Pacific saury *Cololabis saira* (Scomberesocidae, Beloniformes) in open waters and in the northeast Pacific Ocean // J. Ichthyol. V. 53. № 11. P. 899–913.
- Beamish, R.J., Noakes, D.J., McFarlane, G.A., Klyashtorin, L., Ivanov, V.V., Kurashov, V. 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon // Can. J. Fish. Aquat. Sci. V.56. P. 516–526.
- Ceballos L.I., Di Lorenzo E., Hoyos C.D., Schneider N., Taguchi B. 2009. North Pacific Gyre Oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems // J. Climate. V. 22. P. 5163–5174. doi: 10.1175/2009JCLI2848.1.
- CDO 2018 — Climate Data Operators. Accessible via: <http://www.mpimet.mpg.de/cdo>. 01.08.2018.
- Di Lorenzo, E., Schneider N., Cobb K.M., Franks J.S., Chhak K., Miller A.J., McWilliams J., Bograd S.J., Arango H., Curchitser E., Powell T.M., Riviere P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change // Geophys. Res. Lett. 35, L08607. doi: 10.1029/2007GL032838.
- Ebisawa, Y., Sunou, H. 1999. Influence of variation of the Kuroshio water on catch fluctuations of saury, *Cololabis saira*, in the waters off northeastern Japan // Bull. Ibaraki Pref. Fish Exp. Stn. 37. P. 29–36 (in Japanese).
- Eschmeyer W.N., Herald E.S., Hammann H. 1983. A Field Guide to Pacific Coast Fishes of North America. Houghton Mifflin Company, Boston, MA. 336 pp.
- ESRL — NOAA Earth System Research Laboratory's Physical Sciences Division. Accessible via: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. 01.08.2018.).
- Fukushima, S. 1979. Synoptic analysis of migration and fishing conditions of saury in the northwestern Pacific Ocean // Bull. Tohoku. Reg. Fish. Res. Lab. V. 41. P. 1–70 (in Japanese with English abstract).
- Gong Y., Suh Y.S. 2004. Effect of environmental conditions on the stock structure and abundance of the Pacific saury, *Cololabis saira* in the Tsushima Warm Current region // J. Environ. Sci. V. 13. P. 449–467.
- Ito S., Kishi M.J., Kurita K., Oozeki Y., Yamanaka T., Megrey B.A., Werner F.E. 2004. Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model // Fisheries Oceanography. V. 13 (Suppl. 1). P. 111–124. doi: 10.1111/j.1365–2419.2004.00307.x.
- Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, D. Joseph. 1996: The NCEP/NCAR40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 77. P. 437–471.
- Kosaka S. 2000. Life history of Pacific saury *Cololabis saira* find consideration of resource fluctuation based on it // Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst. № 63. P. 1–96.
- Krovnin A.S., Klovach N.V. 2012. The Association of Long-Term Changes in West Kamchatka Pink Salmon Catches with Climate Regime Shifts in the Northern Hemisphere // North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report No. 8. P. 126–129.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // Bull. Am. Meteor. Soc. V. 78. P. 1069–1079.
- Matsumiya, Y., Tanaka, S. 1978. Dynamics of the saury population in the Pacific Ocean off northern Japan. III. Reproductive relations of large and medium sized fish // Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish. V.44. P. 451–455.

- Minobe, S., Mantua, N. 1999. Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific // *Prog. Oceanogr.* V.43. P. 163–192. doi: 10.1016/S0079–6611(99)00008–7.
- Nakamura, H., Lin, G., Yamagawa, T. 1997. Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades // *Bull. Am. Meteor. Soc.* V. 78. P. 2215–2225.
- NPGO — North Pacific Gyre Oscillation. Accessible via: <http://www.o3d.org/npgo/> 01.08.2018.
- Odate S. 1977. On the distribution of Pacific saury in the North Pacific Ocean // *Res. Inst. North Pac. Fish. Fac. Fish. Hokkaido Univ. Spec. Vol.* P. 353–381.
- Report of the Small Scientific on Pacific Saury. 2018 // North Pacific Fisheries Commission. SSC PS03. 29 pp.
- Sinclair, M., Tremblay, M.J. 1985. El Niño events and variability in a Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) survival index: support for Hjort's second hypothesis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 42. P. 602–608.
- Smith T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, Lawrimore J. 2008: Improvements NOAA's Historical Merged Land–Ocean Temp Analysis (1880–2006) // *J. of Climate.* V. 21. P. 2283–2296.
- Suyama S., Kidokoro H., Naya M., Hashimoto M., Vijai D. 2018. Standardization of CPUE data of Pacific saury (*Cololabis saira*) caught by the Japanese stick-held dip net fishery during 1994 to 2017 // North Pacific Fisheries Commission. SSC PS03. WP 05. 25 pp.
- Suyama S., Sakurai Y., Shimazaki K. 1996 a. Age and growth of pacific saury *Cololabis saira*, in the western Pacific ocean estimated from daily otolith growth increments // *Fish. Science.* № 62 (1). P. 1–7.
- Suyama S., Sakurai Y., Shimazaki K. 1996 b. Maturation and age in days of Pacific saury *Cololabis saira* in the central North Pacific Ocean during the summer // *Nippon Suisan Gakkaishi.* № 62 (3). P. 361–369.
- Taguchi, B., S.P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai. 2007: Decadal variability of the Kuroshio extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast // *J. Climate.* V. 20. P. 2357–2377.
- Takahashi, Y. 1997. Long-term cycle of catch of Pacific saury stock // *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.* V. 61. P. 92–94.
- 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.
- Tian Y., Akamine T., Suda M. 2003. Variations in the abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*) from the northwestern Pacific in relation to oceanic-climate changes // *Fish. Res.* V. 60. P. 439–454.
- Tian Y., Akamine T., Suda M. 2002. Long-term variability in the abundance of Pacific saury in the northwestern Pacific ocean and climate changes during the last century // *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.* V. 66. P. 16–25 (in Japanese with English abstract).
- Tian Y., Ueno Y., Suda M., Kamine T. 2004. Decadal variability in the abundance of Pacific saury and its response to climatic/oceanic regime shifts in the northwestern subtropical Pacific during the last half century // *J. of Marine Systems.* V. 52. P. 235–257. doi: 10.1016/j.jmarsys.2004.04.004.
- Trenberth K.E., Hurrell J.W. 1995. Decadal coupled atmosphere–ocean variations in the North Pacific Ocean // *Climate Changes and Northern Fish Populations* / Beamish, R.J. (Ed.). *Can. Spec. Pub. Fish. Aquat. Sci.* No. 121. P. 15–24.
- Tseng C-T., Sun C-L., Yeh S-Z., Chen S-C., Su W-C., Liu D-C. 2011. Influence of climate-driven sea surface temperature increase on potential habitats of the Pacific saury (*Cololabis saira*) // *ICES J. of Marine Science.* V. 68. P. 1105–1113. doi: 10.1093/icesjms/fsr070.
- Watanabe, Y., Oozeki, Y., Kitagawa, D. 1997. Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1067–1076. doi: 10.1139/f97–013.
- Xie S-P, Noguchi H, Matsumura S. 1999. A hemispheric-scale quasi-decadal oscillation and its signature in Northern Japan // *J. of the Meteorological Society of Japan.* V.77. P. 573–582.
- Yeh S-W., Kang Y-J., Noh Y., Miller A.J. 2011. The North Pacific Climate Transitions of the Winters of 1976/77 and 1988/89 // *J. of Climate.* V. 24. P. 1170–1183.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. International catch of Pacific saury in 1950–2017

Fig. 2. Association between catch per unit effort and climatic factors at zero time lag for 1994–2016: changes in mean winter (January–April) NPGO index and CPUE (a); correlation patterns between time series of CPUE and mean winter anomalies of SST (b) and geopotential heights of 500 hPa surface (c); correlation pattern between time series of the NPGO index and SSTA field (d) in the North Pacific

Fig. 3. Association between catch per unit effort and climatic factors with their shift by 5 years ahead for 1994–2016: changes in mean winter (January–April) NPGO index and CPUE (a); correlation patterns between time series of CPUE and mean winter anomalies of geopotential heights of 500 hPa surface (a) and SST (c) in the North Pacific

Fig. 4. Association between saury catch and climatic factors with their shift by 5 years ahead for 1950–1993: correlation patterns between time series of saury catch and mean winter anomalies of SST (a) and geopotential heights of 500 hPa surface (b) in the North Pacific