

ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ

УДК 597.562-152.6.08:551.58

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАПАСА БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ТРЕСКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

© 2016 г. А.А. Филин

*Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича, Мурманск, 183038
E-mail: filin@pinro.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2016

Представлены результаты моделирования динамики запаса трески в Баренцевом море для периода 2015–2050 гг. при трех альтернативных сценариях изменения температуры воды. Согласно модельным оценкам, сохранение долгосрочного тренда на повышение температуры воды не приведет к существенному увеличению численности популяции баренцевоморской трески, если не произойдет изменений в состоянии кормовой базы. Основным фактором, ограничивающим рост численности трески, будет каннибализм. При этом биомасса промыслового запаса должна возрасти за счет ускорения роста рыб вследствие повышения температуры воды. В случае перехода к температурному режиму, наблюдавшемуся во второй половине XX в., следует ожидать снижения биомассы запаса трески при сохранении существующей стратегии промысла. Рассмотрены особенности межгодовой динамики запаса трески при описанных температурных сценариях.

Ключевые слова: треска, Баренцево море, модель СТОКОБАР, температурный сценарий, каннибализм, темп роста, долгосрочный прогноз.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что не только промысел, но и климатические изменения имеют определяющее значение для межгодовой динамики популяций промысловых объектов в Баренцевом море (Drinkwater et al., 2011). Поэтому оценки долгосрочного состояния промысловых запасов, выполненные без учета этого фактора, нельзя считать реалистичными. В то же время следует понимать, что возможности прогнозирования влияния климатических изменений на морские биоресурсы весьма ограничены. Причины этого — комплексный характер воздействия и многообразие связей, посредством которых реализуется прямое и опосредованное влияние изменения климата на промысловые виды.

Обитающая в Баренцевом море популяция трески *Gadus morhua* населяет северные окраины видового ареала. Поэтому ожи-

даемое потепление климата, по крайней мере на начальном этапе, должно положительно отразиться на состоянии ее запаса. Об этом свидетельствуют результаты экстраполяции выявленных закономерностей влияния изменения температуры на рост и пополнение трески (Drinkwater, 2005). Планке и Фредоу (Planque, Frédou, 1999) провели сравнительный анализ влияния изменения температуры воды на численность пополнения промысловых запасов у разных популяций трески, обитающих в Северной Атлантике, включая баренцевоморскую. Результаты показали, что для тех из них, которые встречаются в холодных водах при придонной температуре $\leq 6^{\circ}\text{C}$, повышение температуры воды оказывает положительное влияние на численность пополнения.

Изменение температуры воды влияет также на распределение трески в Баренцевом

море (Ottersen et al., 1998). В условиях потепления треска совершает более протяженные и продолжительные кормовые миграции в северные и восточные районы моря, что положительно отражается на возможности ее откорма (Бойцов и др., 2003). Это приводит к увеличению доступности различных кормовых объектов за счет перекрытия их ареалов с распределением трески.

Экспертные оценки ожидаемых климатических изменений представлены обычно в виде сценариев изменения температуры. Поэтому сценарное моделирование служит основным методом долгосрочного прогнозирования динамики запасов в условиях неопределенностей, связанных с изменением климата. Этот метод не позволяет оценить состояние запаса для конкретного года в отдаленной перспективе, но дает возможность выявить закономерности его изменения в прогнозируемый период с учетом ожидаемых климатических изменений (Ådlandsvik et al., 2011). Для этого используются оценки среднего значения параметров, характеризующих величину и продуктивность популяций, а также коэффициенты вариации и тренды в изменении этих параметров (Hollowed et al., 2009).

Свидетельством климатических изменений в Баренцевом море служит межгодовая динамика температуры воды на гидрологическом разрезе Кольский меридиан. Наблюдения на этом разрезе ведутся с начала прошлого столетия и являются наиболее продолжительными для Баренцева моря (Бойцов, Карсаков, 2010). Полученные данные показывают, что межгодовые температурные изменения в Баренцевом море характеризуются как краткосрочной цикличностью, так и наличием долгосрочных трендов, продолжительность и направленность которых меняются (Бочков, 2005; Карсаков, 2009).

В последние десятилетия в Баренцевом море наблюдается теплый период, характеризующийся повышенной температурой воды и сокращением ледового покрова (Boitsov et al., 2012; Johannesen et al.,

2012). Теплый период отмечали также в 1920–1930-е гг. (Матишов и др., 2013). Относительно дальнейшего изменения температурных условий в Баренцевом море существуют разные точки зрения. По мнению одних специалистов, тренд на повышение температуры сохранится как следствие глобального потепления (IPCC, 2014). По мнению других, произойдет стабилизация температурного режима на достигнутом уровне. Существует также предположение о том, что вследствие цикличности климатических изменений наблюдающийся в последние десятилетия теплый период в Баренцевом море завершится возвратом к норме, за которую приняты условия второй половины XX в. (Kotenev et al., 2011; Boitsov et al., 2012).

Цель работы — сравнительный модельный анализ последствий реализации альтернативных сценариев долгосрочного изменения температуры воды в Баренцевом море для динамики запаса трески.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использовали многовидовую модель СТОКОБАР, которая описывает межгодовую динамику запаса трески в Баренцевом море с учетом трофических взаимоотношений ее с мойвой, изменения температуры воды и воздействия промысла (Филин, 2012). Схема функциональных связей, воспроизводимых в модели, показана на рис. 1. Модель является пространственно-неструктурированной, т.е. без детализации воспроизводимых процессов по отдельным районам. Временной шаг модели (дискретность расчетов) равен одному году. Источниками входных данных при настройке модели служили материалы рабочей группы по арктическому рыболовству ИКЕС (ICES, 2015), российско-норвежская база данных по питанию трески в Баренцевом море (Dolgov et al., 2008), данные по температуре воды на разрезе Кольский меридиан, доступные на официальном сайте ПИНРО (<http://www.pinro.ru>).

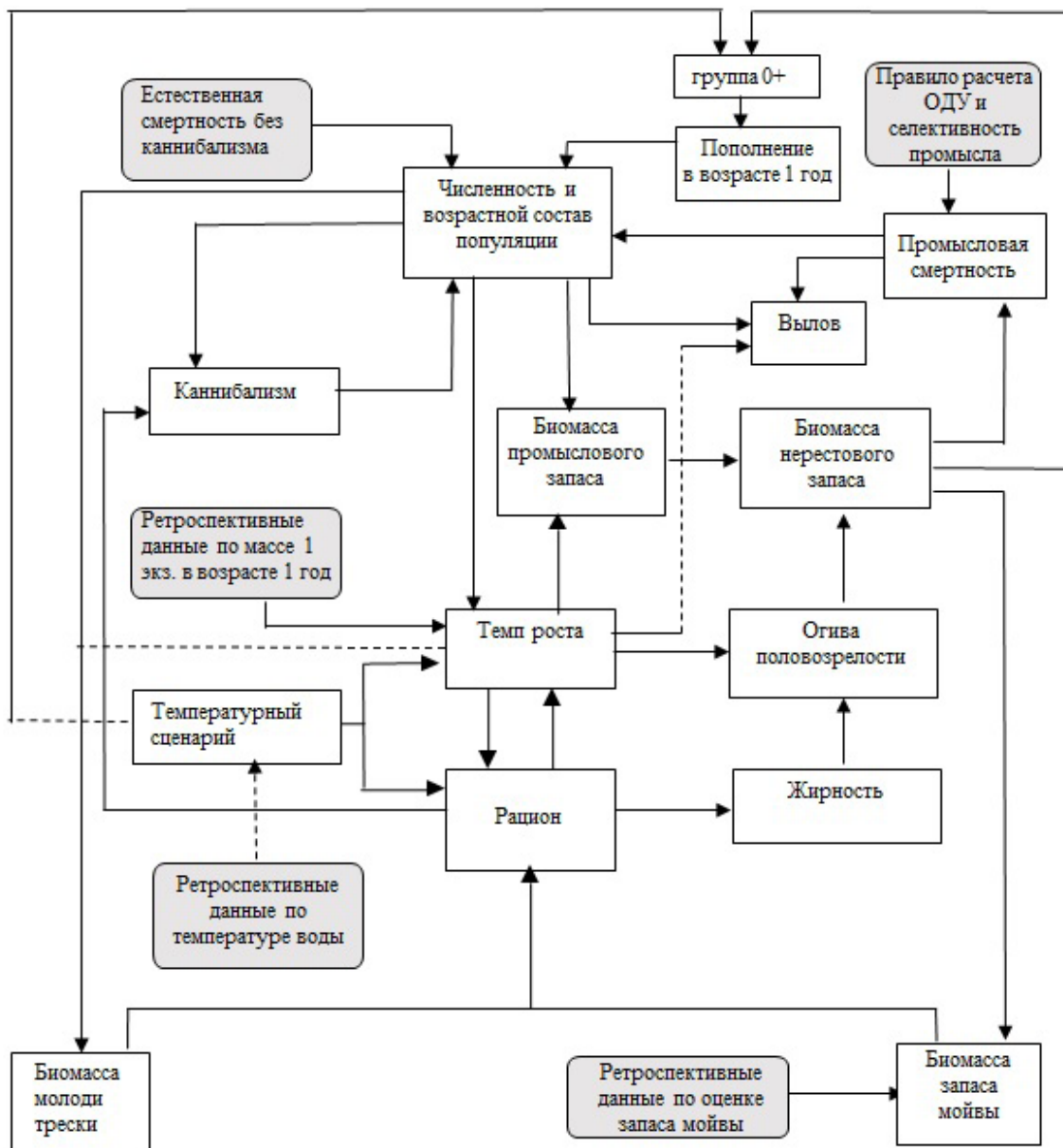


Рис. 1. Схема функциональных связей, воспроизводимых в модели СТОКОБАР: (■) — входные данные, (□) — моделируемые параметры.

В модели температура воды включена в уравнения, формализующие рост и питание трески. За основу приняты уравнения, полученные на основе лабораторных исследований (Jobling, 1988). Они отражают зависимость скорости метаболических процессов у рыб от температуры воды. Для приведения этих уравнений в соответствие с результатами полевых наблюдений и дискретностью модельных расчетов часть коэффициентов была изменена в процессе настройки модели, заключающейся

в минимизации разницы между моделируемыми и наблюдаемыми значениями (Филин, 2012). Рост и интенсивность питания трески зависят в модели не только от температуры воды, но и от численности популяции (плотностной фактор), а также от величины запаса мойвы (состояние кормовой базы).

По сравнению с предыдущим вариантом в модель СТОКОБАР были внесены изменения в расчеты численности пополнения трески в возрасте 1 год. Ранее для этого

применяли уравнение Рикера, посредством которого описывали зависимость численности трески в возрасте 1 год от величины биомассы ее нерестового запаса (Филин, 2012). В новом варианте модели для оценки численности трески в возрасте 1 год использовали моделируемые индексы ее численности для возраста 6 мес. (0-группа). Фактические значения этих индексов с 1980 г. рассчитывают по результатам ежегодной совместной российско-норвежской съемки, выполняемой в Баренцевом море в августе—сентябре (Eriksen, Prozorkevich, 2011). Их используют при оценке урожайности поколений трески и при прогнозировании численности ее пополнения в возрасте 3 лет (ICES, 2015).

Для моделирования индексов численности трески 0-группы использовали следующее уравнение:

$$N_0 = 37,45 \times SSB + 87,92 \times 10^3 \times \ln(T_{(1-6)}) - 118,3 \times 10^3, \quad (1)$$

где N_0 — индексы численности трески 0-группы, млн экз.; SSB — биомасса нерестового запаса трески на начало года, тыс. т; $T_{(1-6)}$ — среднегодовая (для шести предшествовавших лет) температура воды на разрезе Кольский меридиан, станции 3—7, слой 0—200 м, °С.

Теснота связи индексов численности 0-группы трески с биомассой нерестового запаса и средней годовой температурой воды для шести предшествовавших лет характеризовалась коэффициентами корреляции соответственно 0,85 и 0,73 для периода наблюдений 1980—2014 гг. Выявленные корреляционные зависимости отражают причинно-следственные связи. Величина биомассы нерестового запаса, определяя популяционную плодовитость, непосредственно влияет на численность потомства в возрасте 6 мес. Влияние температуры проявляется опосредованно, через ускорение роста. Показано, что рост личинок атлантической трески в теплые годы возрастает за счет повышения первичной продуктивности и увеличения продолжительности периода благоприятных условий питания. Благодаря этому уменьшается смер-

тность, поскольку с увеличением размеров тела доступность личинок трески для хищников (беспозвоночных) снижается, а способность избегать хищников, наоборот, возрастает (Бойцов и др., 2003; Kristiansen et al., 2011).

Для расчета численности трески в возрасте 1 год на основе моделируемых индексов численности 0-группы использовали уравнение линейной регрессии:

$$N_{1(y)} = 0,082 \times N_{0+(y-1)} + 669,72 + \varepsilon, \quad (2)$$

где $N_{1(y)}$ — численность трески в возрасте 1 год на начало года y , млн экз.; $N_{0-(y-1)}$ — моделируемые индексы численности трески 0-группы в предшествовавшем году, млн экз.; ε — стохастическая переменная.

Величина ε отражает неопределенность, связанную с влиянием факторов, не учтенных в модели. При расчетах ее значения выбирали случайным образом из числа остатков между численностью трески в возрасте 1 год, рассчитанной на основе моделируемых индексов численности 0-группы, и соответствующего значения численности годовиков, оцененного в процессе настройки модели.

Для повышения реалистичности модели использовали ограничение предельных значений индекса численности трески 0-группы. Максимальная моделируемая величина не могла превышать 156 млрд экз. (т.е. на 30% выше максимального фактического значения), минимальная равна 34 млн экз. (на 30% меньше минимального фактического значения).

Моделируемые индексы численности трески 0-группы использовали также для воспроизведения в модели зависимости темпа роста рыб на первом году жизни от их численности (влияние плотностного фактора). Фактические данные свидетельствуют, что повышенный темп роста трески в первый год жизни, как правило, имел место, когда индексы численности трески 0-группы не превышали 20 млрд экз. Для модельной реализации этой зависимости был использован непараметрический подход. Ретроспективные данные по средней массе 1 экз.

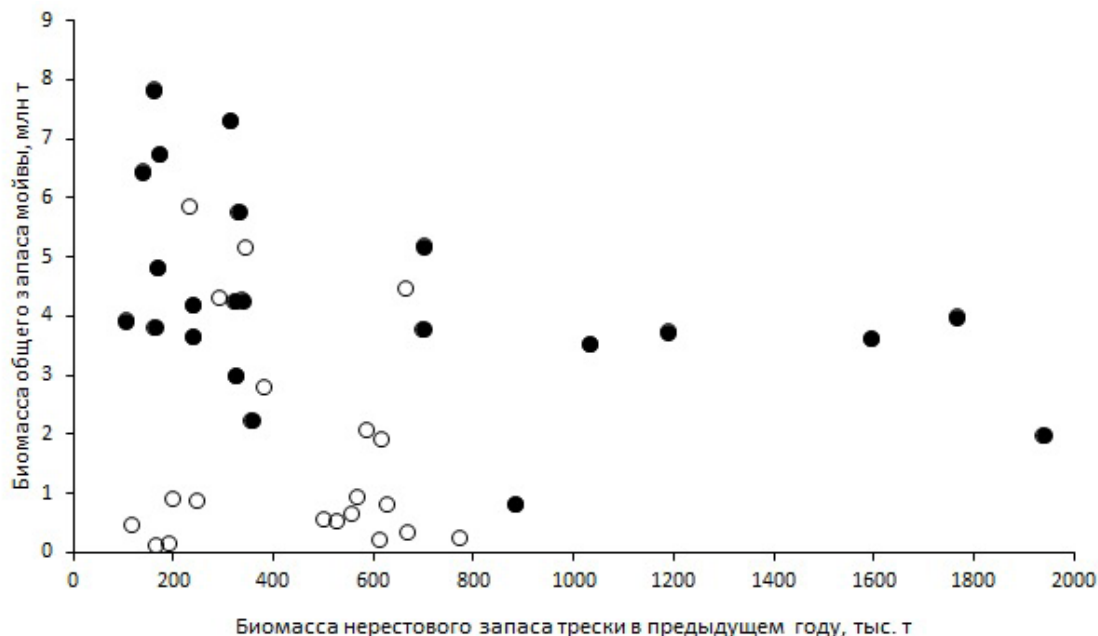


Рис. 2. Величина общего запаса мойвы (по данным акустических съемок 1973–2014 гг. (ICES, 2015)) в зависимости от биомассы нерестового запаса трески в предшествовавшем году; (●) — запас мойвы в предшествовавшем году превышал 3 млн. т.

трески в возрасте 1 год были разделены на два массива в зависимости от того, больше или меньше 20 млрд экз. были значения индексов численности 0-группы в предшествовавшем году. Величину моделируемой массы 1 экз. трески в возрасте 1 год задавали путем случайного выбора значений, используя тот массив ретроспективных данных, который соответствовал моделируемому индексу численности 0-группы.

Межгодовую динамику запаса мойвы также воспроизводили в модели на основе статистических зависимостей, используя ретроспективные данные. Результаты акустических съемок свидетельствуют, что высокий запас мойвы (более 4 млн т) наиболее вероятен, если в предшествовавшем году нерестовый запас трески был менее 500 тыс. т. Кроме того, вероятность того, что запас мойвы превысит среднееголетний уровень (2,96 млн т), значительно возрастает, если в предшествовавшем году его величина была более 3 млн т (рис. 2). Исходя из этого были сформированы четыре массива ретроспективных значений по величине запаса мойвы. В качестве критери-

ев использовали величину биомассы нерестового запаса трески в предшествовавшем году (больше или меньше 500 тыс. т) и величину общего запаса мойвы в предшествовавшем году (больше или меньше 3 млн т).

Сценарий межгодовой динамики запаса мойвы создавали в модели посредством случайного выбора ретроспективных значений. При этом использовали тот массив данных, который соответствовал моделируемым значениям запасов мойвы и трески в предшествовавшем году. Кроме того, для повышения реалистичности модели использовали ограничение соотношения запасов мойвы в рассматриваемом и предшествовавшем годах моделируемого периода (не более 6,7 и не менее 0,14, что соответствует наблюдаемым данным).

Величина запаса мойвы влияет в модели на смертность молоди трески от каннибализма. Последнюю рассчитывали как отношение количества особей в возрасте 1, 2 и 3 года, потребленных треской, к их численности на начало года, выраженное в процентах. Использовали ограничения для макси-

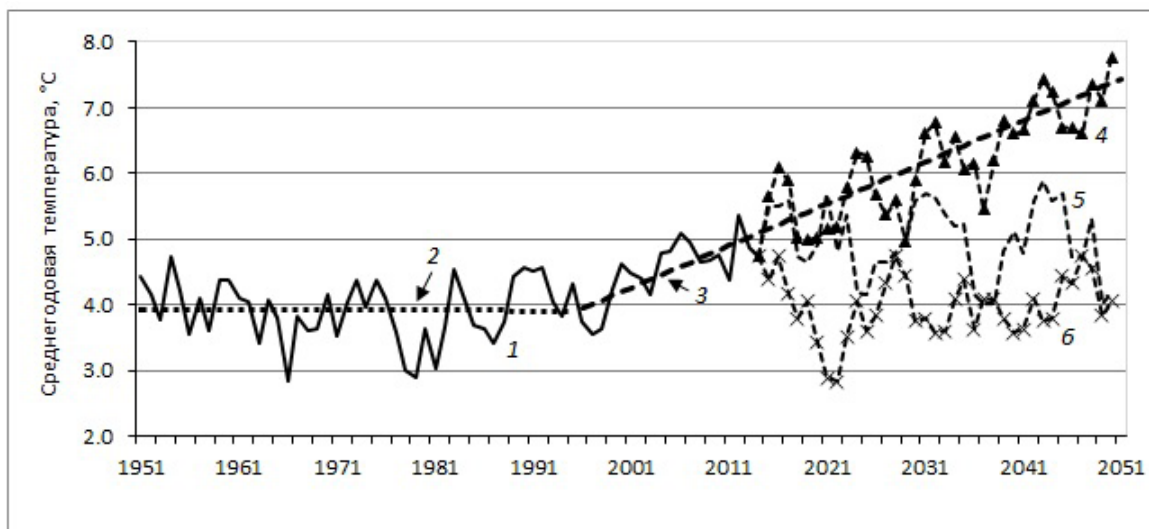


Рис. 3. Модельные сценарии изменения среднегодовой температуры воды на разрезе Кольский меридиан в 2015–2050 гг. в сравнении с ретроспективными данными (1); 2, 3 — линейные тренды соответственно в 1951–1995 гг. и 1996–2014 гг., 4–6 — сценарии 1–3 (сохранение положительного тренда в изменении температуры воды до 2050 г., отсутствие положительного тренда в изменении температуры воды и снижение температуры воды до уровня, наблюдавшегося в 1950–1995 гг.).

мальных моделируемых значений смертности молоди от каннибализма. Эти ограничения приняты с учетом фактических значений, полученных при настройке модели, и составляли 85, 60 и 40% для трески в возрасте соответственно 1, 2 и 3 года.

В качестве стартовых значений для сценарного моделирования использовали данные 2014 г. Модельные расчеты проводили до 2050 г.; для повышения статистической достоверности результатов модельного анализа для каждого температурного сценария выполняли по 100 однотипных прогонок модели.

Управленческий сценарий. Правило расчета общего допустимого улова (ОДУ) трески, реализованное в модели, соответствовало принятому подходу к регулированию промысла северо-восточной арктической трески (ICES, 2015). Как и в существующих правилах управления, коэффициент промысловой смертности трески F_{bar} (среднеарифметическое значение коэффициента промысловой смертности рыб в возрасте 5–10 лет) рассчитывали в модели с использованием биологических ориентиров: $B_{pa} = 460$ тыс. т, $F_{pa} = 0,40$. Кроме того, в соответствии с су-

ществующими правилами использовали ограничение для межгодовых изменений ОДУ в пределах $\pm 10\%$. Ограничение межгодовых изменений ОДУ не действовало, если нерестовый запас был ниже значения B_{pa} , а также в первый год после восстановления биомассы нерестового запаса до уровня B_{pa} . Как и в существующих правилах, предельный уровень снижения коэффициента промысловой смертности при соблюдении заданного ограничения межгодовых изменений ОДУ соответствовал 0,3. В целях реалистичности максимальное значение коэффициента промысловой смертности не превышало 1,5. В модели ОДУ всегда соответствовал вылову. Возрастная селективность промысла трески была принята постоянной и соответствовала значению стартового года.

Температурные сценарии. В работе использовали сценарии изменения температуры воды в Баренцевом море, созданные в модели СТОКОБАР. Строили их на основе данных 1950–2014 гг. по среднегодовой температуре воды в слое 0–200 м на разрезе Кольский меридиан (станции 3–7). Цикличность в межгодовой изменчивости

температуры воды имитировали случайной выборкой значений температуры поочередно из трех массивов ретроспективных данных, представляющих холодные, умеренные и теплые годы. Долгосрочный тренд для температурного сценария создавали посредством добавления последовательно возрастающих приростов к температуре воды в генерируемом временном ряду.

Были созданы три альтернативных сценария изменения температуры воды в Баренцевом море для периода 2015–2050 гг. (рис. 3). Они основываются на различных предположениях о долгосрочных тенденциях изменения температуры воды. Согласно результатам наблюдений, с 1996 г. имеет место положительный тренд в динамике среднегодовой температуры воды на разрезе Кольский меридиан. Первый сценарий предполагает сохранение такого тренда до 2050 г. При втором сценарии исходили из допущения об отсутствии долгосрочной тенденции на повышение температуры воды для периода 2015–2050 гг. Однако предполагали, что достигнутое к 2014 г. повышенное теплосодержание вод, по сравнению с периодом 1950–1995 гг., сохранится. Третий сценарий строили на основе предположения о снижении температуры воды в 2015–2050 гг. до уровня, наблюдавшегося в 1950–1995 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реалистичность модели. О реалистичности модельных оценок можно судить по их соответствию результатам наблюдений. Из трех исследованных температурных сценариев для двух можно выделить периоды-аналоги в ряду ретроспективных данных. Для сценария 2 — это период 2000–2014 гг., а для сценария 3 — 1980–1995 гг. Период 1996–1999 гг. по температурным условиям занимает промежуточное положение между температурными сценариями 2 и 3.

В табл. 1 представлены результаты моделирования в сравнении с аналогичными фактическими данными. Необходимо

учитывать, что правила управления промыслом трески, воспроизведенные в модели, отличались от реальной схемы управления в рассматриваемые годы. Особенно это относится к периоду 1980–1995 гг., когда стратегия промысла трески еще не основывалась на предосторожном подходе (ICES, 2015), поэтому промысловая смертность в те годы была существенно выше моделируемой. Соответственно величина моделируемого запаса трески получилась больше по сравнению с фактическими данными для 1980–1995 гг. Моделируемая численность пополнения, зависящая от величины нерестового запаса, также оказалась выше. При использовании в модели температурного сценария 2 среднеголетний коэффициент промысловой смертности получился близким к фактическому значению для 2000–2014 гг. Поэтому для этого сценария моделируемые значения величины запаса и численности пополнения трески имели больше сходства с данными наблюдений, чем для сценария 3 (табл. 1).

В целом результаты сравнительного анализа моделируемых и фактических среднеголетних значений свидетельствуют о реалистичности модельных оценок и их соответствии выявленным закономерностям межгодовой динамики запаса трески.

Численность пополнения. Моделируемые индексы численности трески 0-группы демонстрируют выраженную зависимость от температурного сценария. Чем более высокую температуру воды предполагает температурный сценарий, тем больше получаются среднеголетние значения моделируемых индексов численности трески 0-группы (табл. 2). При использовании температурных сценариев 1 и 2 межгодовая динамика моделируемых индексов численности трески 0-группы характеризовалась цикличностью (рис. 4, а). При этом для сценария 1, предусматривающего долгосрочный положительный тренд в динамике температуры воды, прослеживался также тренд на увеличение численности трески 0-группы в пределах исследованного периода.

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАПАСА БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ТРЕСКИ

Таблица 1. Среднемноголетние значения моделируемых параметров в сравнении с фактическими данными (осредненные результаты 100 прогонок модели)

Параметр	Моделируемые условия, 2015–2050 гг.		Фактические данные (ICES, 2015)	
	Сценарий 2*	Сценарий 3*	2000–2014 гг.	1980–1995 гг.
Температура воды среднегодовая, °С	4,98 ± 0,01	3,96 ± 0,01	4,72 ± 0,08	3,98 ± 0,12
Индекс численности 0-группы, млрд экз.	68,70 ± 0,30	33,90 ± 0,30	45,90 ± 10,30	14,10 ± 5,30
Пополнение в возрасте 3 года, млн экз.	708,40 ± 4,70	514,20 ± 5,80	700,10 ± 67,20	431,20 ± 74,20
Биомасса промыслового запаса, млн т	2,57 ± 0,01	1,74 ± 0,01	2,31 ± 0,24	1,26 ± 0,14
Численность промыслового запаса, млрд экз.	1,82 ± 0,01	1,44 ± 0,01	1,96 ± 0,13	1,14 ± 0,14
Биомасса нерестового запаса, млн т	1,20 ± 0,01	0,81 ± 0,01	0,94 ± 0,14	0,35 ± 0,06
Средняя масса тела в возрасте 4–6 лет, кг	1,46 ± 0	1,16 ± 0	1,28 ± 0,03	1,48 ± 0,08
Коэффициент промысловой смертности (F_{5-10})	0,42 ± 0	0,42 ± 0	0,49 ± 0,14	0,71 ± 0,05

Примечание. * Представлены на рис. 3.

Таблица 2. Средние значения (M) и коэффициенты вариации (CV, %) моделируемых параметров запаса трески по результатам 100 прогонок модели СТОКОБАР

Параметр	Сценарий 1*		Сценарий 2*		Сценарий 3*	
	M	CV	M	CV	M	CV
Биомасса промыслового запаса, млн т	3,44	25,3	2,57	18,5	1,74	27,7
Биомасса нерестового запаса, млн т	1,64	39,0	1,20	36,0	0,81	43,6
Численность промыслового запаса, млрд экз.	1,97	23,1	1,82	23,4	1,44	34,8
Численность нерестового запаса, млн экз.	271,20	34,9	249,00	36,2	210,60	44,7
Коэффициент промысловой смертности (F_{5-10})	0,41	20,2	0,42	19,6	0,42	24,6
Смертность от каннибализма в возрасте 3 лет, %	31,00	31,5	27,04	37,2	20,20	46,8
Индекс численности 0-группы, млрд экз.	99,50	27,6	68,70	24,1	33,90	45,9
Пополнение в возрасте 3 года, млн экз.	803,10	38,5	708,40	40,1	514,20	67,8

Примечание. * Представлены на рис. 3.

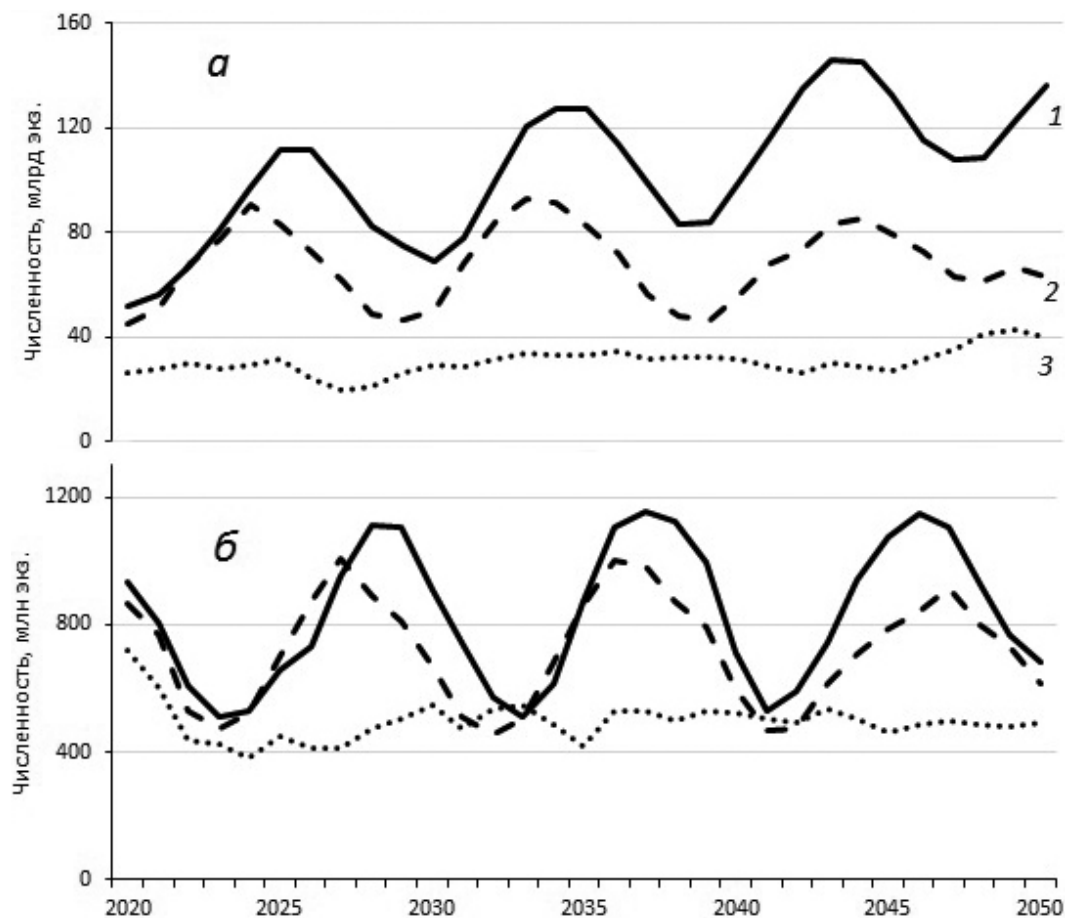


Рис. 4. Моделируемая межгодовая динамика численности трески 0-группы (а) и в возрасте 3 лет (б) при разных сценариях (1–3, см. на рис. 3) изменения температуры воды в Баренцевом море (средненные результаты 100 прогонок модели).

По сравнению с 0-группой численность трески в возрасте 3 лет гораздо меньше зависела от температурного сценария (табл. 2). Ее моделируемая межгодовая динамика также характеризовалась выраженной циклическостью при использовании температурных сценариев 1 и 2. Продолжительность цикла, включавшего фазу роста и снижения численности промыслового пополнения, составляла 9–10 лет (рис. 4, б). В отличие от 0-группы для промыслового пополнения трески отсутствовал тренд на повышения численности при использовании в модели температурного сценария 1 (рис. 4).

Величина запаса. Наибольшие среднесноголетние значения биомассы промыслового и нерестового запасов трески получе-

ны в модели для температурного сценария 1, а наименьшие — для сценария 3 (табл. 2). Таким образом, согласно модельным оценкам сохранение темпа потепления воды в Баренцевом море, которое наблюдается со второй половины 1990-х гг., должно способствовать росту биомассы запаса трески в долгосрочной перспективе. Однако моделируемый рост биомассы запаса трески при потеплении воды в Баренцевом море связан прежде всего с ожидаемым увеличением размеров рыб. В отличие от биомассы запаса его моделируемая среднесноголетняя численность получилась близкой для сценариев 1 и 2 (табл. 2).

При возврате к температурному режиму 1950–1995 гг. следует ожидать снижения среднесноголетнего значения био-

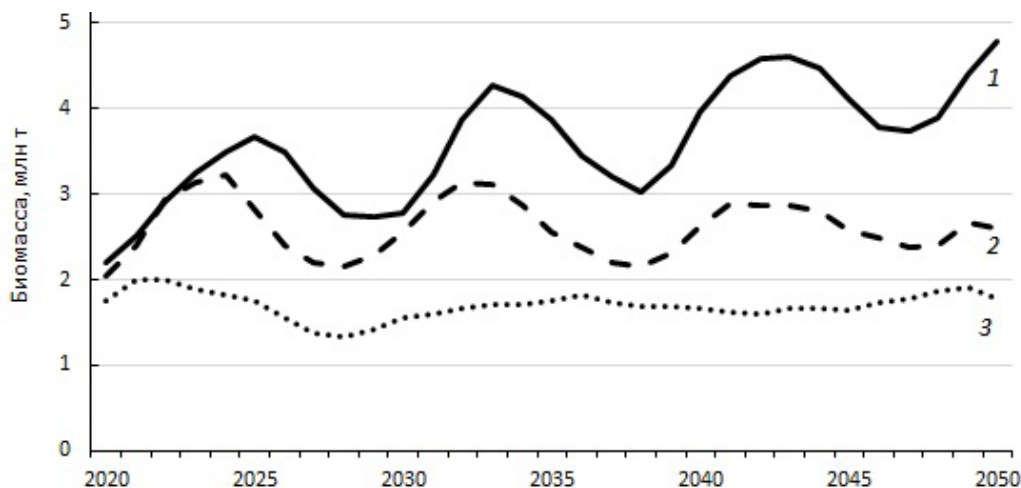


Рис. 5. Моделируемая межгодовая динамика биомассы промыслового запаса трески при разных сценариях (1–3, см. на рис. 3) изменения температуры воды в Баренцевом море (осредненные результаты 100 прогонок модели).

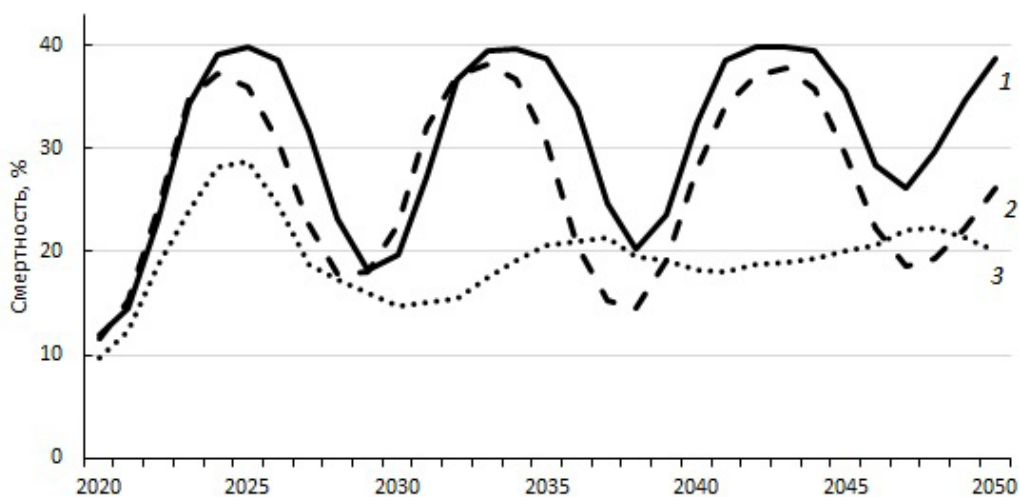


Рис. 6. Моделируемая межгодовая динамика смертности трески от каннибализма в возрасте 3 лет при разных сценариях (1–3, см. на рис. 3) изменения температуры воды в Баренцевом море (осредненные результаты 100 прогонок модели).

массы запаса трески. Это при условии, что существующая стратегия промысла трески в Баренцевом море не будет меняться. Среднегодовые значения коэффициента промысловой смертности трески в модели получились близкими для всех исследованных температурных сценариев (табл. 2).

Межгодовая изменчивость моделируемой биомассы промыслового запаса трески характеризовалась выраженной синхрон-

ной цикличностью при повторных прогонках модели, если использовали температурные сценарии 1 и 2. Продолжительность цикла, включавшего периоды последовательного роста и снижения запаса, составляла 9–11 лет (рис. 5). Периоды максимальной биомассы промыслового запаса были сдвинуты на 4–5 лет вперед по сравнению с периодами максимальной численности пополнения (рис. 4). При использовании температурно-

го сценария 3 цикличность в межгодовой динамике моделируемого промыслового запаса трески не проявлялась по осредненным результатам множественной прогонки модели.

Каннибализм. В модели главным фактором внутриволюляционного регулирования численности трески служит каннибализм. Увеличение биомассы запаса трески приводило к росту смертности ее молодежи от каннибализма (табл. 2). Цикличность в межгодовой динамике смертности от каннибализма предопределяла цикличность в пополнении промыслового запаса трески с учетом соответствующих временных сдвигов (рис. 6). В свою очередь динамика запасов трески и мойвы отражалась на межгодовой изменчивости уровня каннибализма у трески.

Выявленное в модели влияние каннибализма на формирование урожайности поколений трески согласуется с результатами наблюдений. Так, в связи с повышенным уровнем каннибализма урожайность поколений трески 1985 и 1986 гг. в возрасте 3 лет оказалась гораздо ниже ожидаемой, исходя из ее оценок для 0-группы (Hуlen et al., 2008). С другой стороны, высокие коэффициенты выживаемости трески поколений 1980 и 1981 гг. от 0-группы до возраста 2+ связывают с низким уровнем каннибализма (Бойцов и др., 2003).

Влияние температурных сценариев на динамику запаса. Как отмечено выше, при использовании в модели температурных сценариев 1 и 2 в межгодовой динамике величины запаса трески проявляется выраженная синхронная цикличность при повторных прогонках модели. Эта цикличность отражает реализованные в модели зависимости уровня каннибализма у трески от размера ее популяции и величины запаса мойвы, а также закономерности динамики запаса мойвы в зависимости от состояния запаса трески. Отсутствие цикличности в динамике запаса трески при использовании в модели температурного сценария 3 обусловлено следующим. По сравнению с температурным сценарием 3 сценарии 1 и 2 характеризуют улучшенные условия выживания трески в первые 6 ме-

сяцев жизни. Соответственно, при их использовании вероятность появления высокоурожайных поколений трески в возрасте 0-группы гораздо выше, чем при сценарии 3. Вместе с тем кормовая база трески в модели не зависит от повышения температуры воды. В связи с этим смертность молодежи трески от каннибализма возрастает в периоды высокой численности популяции, приводя в модели к периодическому росту и снижению запаса трески. При температурном сценарии 3 влияние каннибализма на динамику промыслового пополнения трески снижается в связи с более низкой вероятностью появления высокой численности 0-группы. Кроме того, в условиях пониженной численности 0-группы в модели возрастает роль стохастического фактора при формировании высокоурожайных поколений трески в соответствии с формулой (2). Все это приводит к нарушению цикличности в моделируемой межгодовой динамике запаса, обусловленной внутриволюльным механизмом регулирования численности.

Аналогичная ситуация, по-видимому, имеет место в реальности. В период долгосрочного потепления первоначально создаются условия для увеличения численности трески на ранних стадиях развития. Это обусловлено тем, что поверхностный слой воды в большей степени подвержен климатическим изменениям (IPCC, 2014). Вследствие этого рост пищевой обеспеченности личинок и мальков трески может опережать соответствующие изменения кормовой базы молодежи и взрослых особей. Поэтому на начальном этапе перестройки экосистемы Баренцева моря вследствие потепления климата возможна диспропорция в росте популяции трески за счет увеличения численности 0-группы. В этих условиях должна возрастать роль внутриволюляционных механизмов регулирования численности в соответствии с состоянием кормовой базы, что предопределяет цикличность в межгодовой динамике запаса. Фактические данные за последние два десятилетия в целом соответствуют такому представлению. По мере стабилизации тем-

пературного режима и соответствующих изменений в состоянии кормовой базы следует ожидать нарушения цикличности в межгодовой динамике запаса трески.

Согласно модельному анализу, при сохранении потепления и современной стратегии промысла в Баренцевом море рост запаса трески наиболее вероятен в 2022–2025, 2031–2034 и 2041–2045 гг. Его снижения следует ожидать в 2027–2030, 2037–2039 и 2046–2049 гг.

Неопределенность модельных оценок. Моделирование динамики запасов промысловых объектов с учетом климатических изменений всегда сопряжено с высоким уровнем неопределенности (Howell et al., 2013). В наших модельных оценках это связано, прежде всего, с возможными изменениями емкости среды для трески в условиях потепления воды в Баренцевом море. Этот параметр определяет предельные возможности роста величины запаса трески в соответствии с потенциалом кормовой базы. В модели не рассматривали изменение параметра емкости среды от температурных условий. Исходили из того, что рост запаса мойвы, являющейся основным кормовым объектом трески в Баренцевом море, маловероятен в условиях повышения температуры воды и увеличения запаса трески. Нет достаточных оснований считать, что при исследованных сценариях потепления произойдет существенное улучшение кормовой базы трески в Баренцевом море за счет новых или альтернативных объектов питания.

Вместе с тем очевидной является перспектива расширения нагульного ареала трески в условиях потепления. Это должно позитивно отразиться на возможностях ее откорма благодаря вовлечению дополнительных ресурсов. Однако конечный эффект неясен, поскольку для совершения более продолжительных миграций потребуются увеличение энергетических затрат. Это в свою очередь приведет к росту пищевых потребностей. Влияние этих факторов в модели не учитывали. Также не принимали во внимание изменение степени перекрытия районов распределения

молоди и взрослых особей трески и мойвы при разных сценариях климатических изменений. Это способно существенно повлиять на уровень каннибализма (Howell, Filin, 2014). Кроме того, есть основания полагать, что при долгосрочном потеплении места нереста баренцевоморской трески сместятся в северном и восточном направлениях (Sundby, Nakken, 2008). Однако в условиях недостатка данных включение этих факторов в модель представляется нецелесообразным. Это может в большей степени привести к неопределенности модельных оценок, чем к повышению их реалистичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бойцов В.Д., Карсаков А.А. 110 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» Баренцева моря // Рыб. хоз-во. 2010. № 3. С. 49–52.

Бойцов В.Д., Лебедь Н.И., Пономаренко В.П. и др. Треска Баренцева моря: биология и промысел. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. 296 с.

Бочков Ю.А. Крупномасштабные колебания температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и их прогнозирование // Сб. докл. Междунар. симп. «100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море». Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. С. 47–64.

Карсаков А.А. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.

Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Денисов В.В. и др. Учет вековой динамики климата Баренцева моря при планировании морской деятельности // Тр. КолНИЦ РАН. 2013. Т. 1. № 14. С. 56–71.

Филин А.А. Моделирование взаимоотношений трески и мойвы в экосистеме Баренцева моря: теоретические аспекты и практическое значение // Вопр. рыболовства. 2012. Т. 13. № 2(50). С. 384–395.

Ådlandsvik B., Budgell W.P., Sandø A.B. Regional climate scenarios for the

- Barents Sea // Proc. 15th Russian-Norwegian Symp. «Climate change and effects on the Barents Sea marine living resources». Bergen: IMR; PINRO, 2011. P. 39–45.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G.* Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. Marine Sci. 2012. V. 69. P. 833–840.
- Dolgov A.V., Yaragina N.A., Orlova E.L. et al.* 20th anniversary of the PINRO-IMR cooperation in the investigations of feeding in the Barents Sea. Results and perspectives // Proc. 12th Norwegian-Russian Symp. «Long-term bilateral Russian-Norwegian scientific cooperation as a basis for sustainable management of living marine resources in the Barents Sea». Bergen: IMR; PINRO, 2008. P. 44–78.
- Drinkwater K.F.* The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change // ICES J. Marine Sci. 2005. V. 62. P. 1327–1337.
- Drinkwater K., Loeng H., Titov O.V. et al.* Climate impacts on the Barents Sea ecosystem // The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Acad. Press, 2011. P. 777–807.
- Eriksen E., Prozorkevich D.V.* 0-group surveys // The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Acad. Press, 2011. P. 557–569.
- Hollowed A.B., Bond N.A., Wilderbuer T.K. et al.* A framework for modelling fish and shellfish responses to future climate change // ICES J. Marine Sci. 2009. V. 66. P. 1584–1594.
- Howell D., Filin A.A.* Modelling the likely impacts of climate-driven changes in cod-capelin overlap in the Barents Sea // Ibid. 2014. V. 71. P. 72–80.
- Howell D., Filin A.A., Bogstad B., Stiansen J.E.* Unquantifiable uncertainty in projecting stock response to climate change: example from NEA cod // J. Marine Biol. Res. 2013. V. 9. P. 920–931.
- Hysten A., Nakken O., Nedreaas K.* Northeast Arctic cod: fisheries, life history, fluctuations and management // Norwegian Spring-spawning herring and Northeast Arctic cod 100 years of research and management. Trondheim: Tapir Acad. Press, 2008. P. 83–118.
- ICES. Report of the Arctic fisheries working group. Doc. CM 20015/ACOM: 05. Copenhagen, 2015. 639 p.
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Pachauri R.K., Meyer L.A. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
- Jobling M.* A review of the physiological and nutritional energetics of cod, *Gadus morhua* L., with particular reference to growth under farmed conditions // Aquaculture. 1988. V. 70. P. 1–19.
- Johannesen E., Ingvaldsen R., Dalpadado P. et al.* Barents Sea ecosystem state 1970–2009: climate fluctuations, human impact and trophic interactions // ICES J. Marine Sci. 2012. V. 69. P. 880–889.
- Kotenev B.N., Krovvin A.S., Rodionov S.N.* Climate trend forecast for the Norwegian and Barents Seas in 2012–2025 // Proc. 15th Russian-Norwegian Symp. «Climate change and effects on the Barents Sea marine living resources». Bergen: IMR; PINRO, 2011. P. 19–38.
- Kristiansen T., Drinkwater K.F., Lough R.G., Sundby S.* Recruitment variability in North Atlantic cod and match-mismatch dynamics // J. PLoS One. 2011. V. 6(3). P. e17456. doi:10.1371/journal.pone.0017456.
- Ottersen G., Michalsen K., Nakken O.* Ambient temperature and distribution of Northeast Arctic cod // ICES J. Marine Sci. 1998. V. 55. P. 67–85.
- Planque B., Frédou T.* Temperature and the recruitment of Atlantic cod (*Gadus morhua*) // Canad. J. Fish. Aquatic Sci. 1999. V. 56. P. 2069–2077.
- Sundby S., Nankeen O.* Spatial shifts in spawning habitats of Arcto-Norwegian cod related to multidecadal climate oscillations and climate change // ICES J. Marine Sci. 2008. V. 65. P. 953–962.

**MODEL ANALYSIS OF STOCK DYNAMICS
OF THE BARENTS SEA COD UNDER THE DIFFERENT
SCENARIOS OF LONG-TERM TEMPERATURE CHANGE**

© 2016 г. А.А. Филин

*Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries
and Oceanography, Murmansk, 183038*

Results from the simulation of cod stock dynamics in the Barents Sea in 2015–2050 under the three alternative scenarios of temperature change are presented. According to the model evaluation, the long-term trend of temperature raise will not lead to a significant increase of population of the Barents Sea cod, unless food supply remains unchanged. The cannibalism will be the main factor limiting the growth of cod abundance. The stock biomass would increase due to acceleration of cod growth rate induced by water temperature warming. If the water temperature becomes the same as the temperature regime of the second half of the XX century, then the cod stock will decrease while maintaining the current fishing strategy. The features of the interannual dynamics of the cod stock under the various temperature scenarios are considered.

Keywords: cod, Barents Sea, temperature scenario, STOCOBAR model, cannibalism, growth rate, long-term prognosis.