



Ю.А. Ковалев, Н.А. Ярагина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ
ПРИ ОЦЕНКЕ ОБЩЕГО ДОПУСТИМОГО УЛОВА



GADUS MORHUA

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА И ОКЕАНОГРАФИИ» (ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»)**

Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича)



Ю.А. КОВАЛЕВ, Н.А. ЯРАГИНА

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ
ПРИ ОЦЕНКЕ ОБЩЕГО ДОПУСТИМОГО УЛОВА**

**Мурманск
2024**

УДК 597.562(268.4)
К56

Рецензент:

О.В. Карамушко, канд. биол. наук

К56 **Ковалев, Ю.А.** Прогнозирование биологических параметров северо-восточной арктической трески при оценке общего допустимого улова / Ю.А. Ковалев, Н.А. Ярагина; Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2024. – 37 с.

ISBN 978-5-86349-300-8

Представлена история использования ряда биологических параметров северо-восточной арктической трески (СВА) для оценки динамики ее запаса.

Рассмотрены подходы к прогнозированию средней массы северо-восточной арктической трески в запасе и уловах, используемые при оценке общих допустимых уловов этого объекта промысла. Предложен новый метод расчета средней массы рыб с применением уравнения Бергаланфи и оценена его эффективность для сглаживания зашумленных данных, восстановления отсутствующих значений и прогноза на ближайшие 1-3 года.

Освещены теоретические вопросы связи темпа роста рыб с некоторыми экологическими факторами. Рассмотрен ряд возможных предикторов для средней массы трески с помощью статистического анализа, получены уравнения множественных линейных регрессий для темпа роста трески в зависимости от биотических и абиотических факторов среды, которые можно использовать для долгосрочного прогнозирования.

Показаны способы прогнозирования доли половозрелых рыб и коэффициента естественной смертности по причине каннибализма, необходимые для оценки запаса СВА трески.

Издание предназначено для специалистов рыбохозяйственных институтов и студентов вузов.

Редакционная коллегия:

*К.М. Соколов, канд. биол. наук (научный редактор),
А.В. Долгов, д-р биол. наук, А.Г. Трофимов, канд. геогр. наук*

ISBN 978-5-86349-300-8

© «ПИНРО» им. Н.М. Книповича, 2024

FEDERAL AGENCY FOR FISHERIES

**STATE SCIENTIFIC CENTER OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY RESEARCH INSTITUTION
“RUSSIAN FEDERAL RESEARCH INSTITUTE
OF FISHERIES AND OCEANOGRAPHY (RF SSC FSBSI “VNIRO”)**

**POLAR BRANCH OF RF SSC FSBSI “VNIRO”
 (“PINRO” NAMED AFTER N.M.KNIPOVICH)**



YU.A. KOVALEV, N.A. YARAGINA

**PREDICTION OF BIOLOGICAL PARAMETERS
OF THE NORTHEAST ARCTIC COD
FOR ESTIMATING THE TOTAL ALLOWABLE CATCH**

**Murmansk
2024**

Reviewer:
O.V. Karamushko, Ph.D (Biology)

Kovalev, Yu.A. Prediction of biological parameters of the Northeast Arctic cod for estimating the total allowable catch / Yu.A. Kovalev, N.A. Yaragina; Polar branch of RF SSC FSBSI “VNIRO” (“PINRO” named after N.M. Knipovich). – Murmansk: PINRO named after N.M. Knipovich, 2024. – 37 p.

ISBN 978-5-86349-300-8

The history of employing a number of biological parameters of the Northeast Arctic cod to evaluate the dynamics of this stock is outlined.

The study describes the approaches to predicting the average weight of the Northeast Arctic cod in stock and catch used for the estimation of the total allowable catch. A new method to estimate the average weight of fish using the Bertalanffy equation is suggested, and its efficacy in smoothing noisy data, replacing absent values, and predicting for the next 1-3 years is evaluated.

Theoretical issues of relationship between fish growth rate and some environmental factors are clarified. Some potential predictors for the average weight of cod based on statistical analysis are considered. Linear regression models for cod growth rates depending on biotic and abiotic environmental factors are obtained, which can be applicable for long-term forecasting.

Methods for predicting the proportion of mature fish and natural mortality caused by cannibalism, which are essential for estimating the Northeast Arctic cod stock, are presented.

The brochure is intended for fisheries scientists and university students.

Editorial Board:

K.M. Sokolov, PhD (Biology) (Science Editor),

A.V. Dolgov, DSc (Biology), A.G. Trofimov, PhD (Geography)

ВВЕДЕНИЕ

Для организации устойчивого промысла в рамках предосторожного подхода, принятого международным сообществом (Precautionary approach to..., 1995; Бабаян, 2000), требуются глубокие знания об экосистеме водоема, где ведется промысел, включая информацию о численности и биомассе рыб облавливаемого вида, их миграциях, размножении, питании, внутривидовых и межвидовых связях в экосистеме, а также о влиянии, обусловленном факторами среды. Для получения таких знаний проводятся научные исследования как теоретического, так и прикладного плана, выполняются съемки запасов в целях сбора данных для оценки численности объектов промысла и их биологических параметров (длины, массы, упитанности, жирности, возрастного состава, состояния половой зрелости, питания и т.д.). Необходимы регулярные наблюдения за ведением промысла и учет количества вылавливаемых объектов и их биологических характеристик (например, размерного и возрастного состава). Все эти знания нужны для определения продукционных возможностей запасов, их текущего состояния и прогнозирования динамики на ближайшие годы; горизонт прогнозирования зависит от объекта промысла и возможностей прогностических моделей. Получаемые прогнозы служат для составления рекомендаций по промыслу на ближайшие годы и гарантируют оптимальное использование популяций/запасов, а также неистощительный/предосторожный промысел, не подрывающий репродуктивную способность популяции. Рекомендации применяются менеджерами для установления общих допустимых уловов (ОДУ) объектов промысла в рамках национальных или международных структур (комиссий), регулирующих ведение промысла.

Северо-восточная арктическая треска (*Gadus morhua* L.) – один из традиционных объектов промысла, ее лов давно ведется в Баренцевом и сопредельных морях (Треска Баренцева моря..., 1996). Регулирование промысла СВА трески имеет богатую историю и в настоящее время содержит набор правил, включая как технические меры (например, установление определенных параметров орудий лова, минимальных промысловых размеров рыб, закрытие районов с высокими приловами молоди и др.), так и лимиты вылова или ОДУ (The Barents Sea..., 2011). Впервые ОДУ на траловый промысел СВА трески был установлен в 1978 г. в рамках Смешанной российско-норвежской комиссии по рыболовству (СРНК). Комиссия для определения объема ОДУ трески до 2021 г. пользовалась рекомендациями ИКЕС (Международный совет по исследованию моря), вырабатываемыми на Рабочей группе ИКЕС по арктическому рыболовству (AFWG) и утверждаемыми Консультативным комитетом ИКЕС (АСОМ). С 2022 г. СРНК, по политическим причинам,

принимает решения по ОДУ на основании рекомендаций Совместной российско-норвежской Рабочей группы по арктическому рыболовству (JRN-AFWG), выполняющей оценки согласно методикам ИКЕС.

Большим шагом в оптимизации промысла СВА трески стало соглашение о Правиле регулирования промысла (ППП; Harvest control rule – HCR), принятом 31-й сессией СРНК. Оно введено в действие в 2004 г. и направлено на стабилизацию годовых ОДУ и создание условий для высоких долгосрочных уловов. Усовершенствованное Правило регулирования промысла трески, которое используется в рамках СРНК в настоящее время (с 2016 г.), было разработано в начале 2010-х годов, в период роста ее запасов, и призвано, в частности, увеличивать промысловую нагрузку на популяцию трески при высоком уровне состояния ее запасов (при нерестовом запасе намного выше предосторожного биологического ориентира $B_{pa} = 460$ тыс. т), нивелируя тем самым «давление» трески на экосистему Баренцева моря. Следует отметить, что среднемноголетнее (1946-2020 гг.) значение нерестового запаса составляет 570 тыс. т (Arctic Fisheries Working..., 2021). Правило имеет сложную структуру (рис. 1) и предполагает обращение к разным величинам целевой промысловой смертности F_{tg} при увеличении нерестового запаса. Применение такого Правила требует прогноза динамики численности и биологических параметров запаса на 3-4 года вперед. В связи с этим особенно актуальными становятся исследования по прогнозированию параметров запаса, имеющие целью заблаговременное предсказание тенденций его развития, включающее изменения численности под влиянием промысловой и естественной смертности рыб, биологических характеристик (массы рыб, динамики полового созревания особей в стаде, урожайности новых поколений) и ожидаемых параметров промысла. В частности, необходим метод прогнозирования таких важных для оценки биомассы запасов СВА трески параметров, как масса рыб в запасе и улове, тем более что для ее особей характерны большие сезонные и межгодовые вариации длины и массы.

Темп полового созревания СВА трески также подвержен значительным межгодовым колебаниям (Пономаренко, 1984; Jørgensen, 1990; Ponomarenko, Yaragina, 1994; Ajiad, Jakobsen, Nakken, 1999), причем созревание отдельного поколения может быть сильно растянуто во времени. В течение продолжительного исторического периода наблюдается тенденция увеличения доли половозрелых особей (Jørgensen, 1990; Ponomarenko, Yaragina, 1994). Однако ранее при оценке запасов эта тенденция игнорировалась, и в ретроспективе использовалась ножевидная кривая (knife-edge) половозрелости, предполагающая, что все рыбы в возрасте младше 8 лет являются неполовозрелыми, а все рыбы в возрасте

8 лет и старше – половозрелыми (Report of the..., 2000). Применение такой кривой искажало величины биомассы нерестового запаса: количество половозрелых особей возрастных групп 5, 6 и 7 лет недооценивалось использованной ранее огивой, а численность рыб от 8 лет и старше, которые в исторический период доминировали в нерестовом запасе, значительно переоценивалась ножевидной кривой, и в результате происходила переоценка всего нерестового запаса. После введения в 1999 г. принципов предосторожного подхода при разработке рекомендаций по управлению запасами рыб, находящихся под эгидой ИКЕС, стало ясно, что без достоверных знаний о динамике полового созревания трески невозможно определение реальных величин биологических ориентиров $MBAL$ (Minimum Biomass Acceptable Level), B_{pa} , B_{lim} . Рекомендации по управлению запасами, разработанные на основании смещенных (biased) величин биологических ориентиров, могут быть неэффективны. В связи с этим была проведена работа по восстановлению рядов данных по огивам половозрелости за 1946-1981 гг. (Report of the..., 2001).

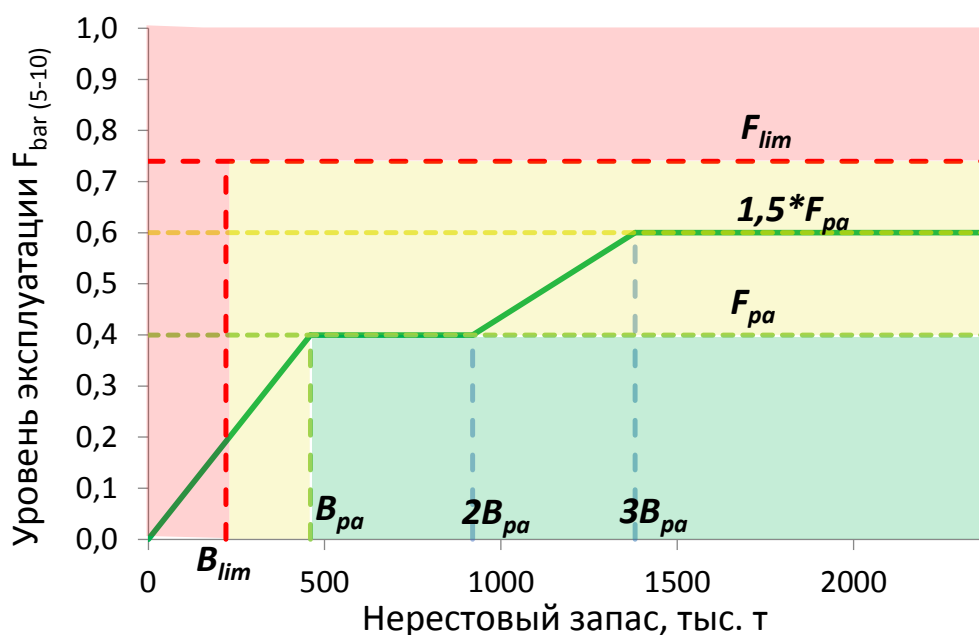


Рис. 1. Правило регулирования промысла (ПРП) СВА трески, введенное в действие на 46-й сессии СРНК. Зоны, окрашенные в рамках концепции предосторожного подхода: голубая – «безопасная»; желтая – «повышенного риска»; розовая – «высокого риска» подрыва запаса по пополнению. Сплошной зеленой линией обозначен уровень целевой смертности при разных значениях биомассы нерестового запаса; B_{pa} – ориентир по биомассе нерестового запаса, соответствующий предосторожному подходу; B_{lim} – граничный ориентир по биомассе нерестового запаса; F_{pa} – ориентир по интенсивности промысла, соответствующий предосторожному подходу; F_{lim} – граничный ориентир по интенсивности промысла

Каннибализм является весомой причиной естественной смертности молоди СВА трески. Его интенсивность колеблется по годам и зависит от многих факторов, в том числе от численности молоди трески, биомассы запаса взрослой трески, биомассы запаса мойвы – основной пищи трески (Yaragina, Bogstad, Kovalev, 2009), поэтому данные о каннибализме были включены в оценку запасов трески начиная с 1995 г. Это привело к несогласованности временных рядов численности трески с 1984 г., когда появились подробные материалы для оценки потребления треской собственной молоди (Долгов, 1995), и в ретроспективе (1946-1983 гг.). Для устранения несоответствия были восстановлены значения коэффициентов мгновенной естественной смертности, вызванной каннибализмом, за 1946-1983 гг. Для этого использовались данные о содержимом желудков трески в возрасте 3-5 лет за весь период наблюдений (Yaragina, Kovalev, Chetyrkin, 2018).

Треска Баренцева моря – один из хорошо изученных запасов, которые наиболее полно обеспечены материалами, в том числе о межгодовой динамике массы рыб по возрастам. В настоящей работе мы попытались проследить историю изменения методов прогнозирования и найти новые подходы для получения необходимых сведений о массе рыб и доле половозрелых рыб по возрастам, а также о коэффициентах мгновенной естественной смертности, вызванной каннибализмом. Наше исследование может быть полезно также для прогнозирования других запасов, плохо обеспеченных данными.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Масса тела рыб по возрастам в запасе и уловах, доля половозрелых рыб по возрастам, численность поколений в возрасте 3 лет (пополнение), промысловая смертность по возрастам, естественная смертность из-за каннибализма в возрасте 3-6 лет, величины промыслового и нерестового запасов СВА трески взяты из отчета Рабочей группы ИКЕС по арктическому рыболовству (Arctic Fisheries Working..., 2021).

Масса рыб по возрастам в запасе СВА трески рассчитывается как средневзвешенные по числу рыб данные российских и норвежских съемок, проводимых в течение осеннего и зимнего сезонов (Arctic Fisheries Working..., 2021), масса рыб по возрастам в уловах – как средневзвешенное по уловам разных стран значение.

Информация о доле половозрелой трески, используемая ИКЕС, получена путем объединения российских и норвежских данных. Российские ретроспективные материалы по огивам половозрелости рассчитаны на основе визуальных определений стадий зрелости гонад в море с ноября по февраль, норвежские – на основе метода Дж.А. Галланда (Gulland, 1964) по нерестовым меткам на отолитах. Несмотря на различие в методах, были получены сходные результаты, показывающие увеличение темпа полового созревания трески за 50-летний период. Затем норвежские и российские данные были объединены для построения новой матрицы параметров доли половозрелых рыб по возрастам взамен фиксированных значений, применявшихся с 1946 по 1981 г. (Report of the..., 2001).

С 1982 г. по настоящее время при оценке запаса используются фактические данные по огивам половозрелости, полученные в съемках запасов (Report of the..., 2023). Норвежские и российские материалы съемок рассчитываются как средневзвешенные по числу рыб (Kovalev, Bogstad, Yaragina, 2021).

Естественная смертность при оценке запаса принимается равной 0,2 плюс смертность от каннибализма для рыб в возрасте от 1 до 6 лет. Метод расчета потребления пищи треской, описанный Б. Богстадом и С. Мелем (Bogstad, Mehl, 1997), используется для определения потребления треской собственной молоди для в модели SAM (State-space fish stock assessment model; Nielsen, Berg, 2014). Потребление рассчитывается на основе фактических данных о содержимом желудков трески из совместной базы материалов Полярного института морского рыбного хозяйства и океанографии (в настоящее время Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» [«ПИИРО» им. Н.М. Книповича]) и Бергенского института морских исследований (БИМИ, Норвегия) (методы описаны в работе Mehl, Yaragina, 1992). В 1984-2021 гг. ежегодно анализировалось в среднем около 9000 желудков трески Баренцева моря. На основе этих данных

рассчитывается потребление молоди трески на 1 экз. трески за каждое полугодие (по возрастным группам жертв 3-6 лет и возрастным группам хищников 3-11+ лет). Делается допущение, что половозрелая часть запаса трески находится за пределами Баренцева моря в течение 3 мес. первого полугодия. Таким образом, предполагается, что потребление половозрелой треской собственной молоди в период нереста отсутствует. Расчет значений смертности от каннибализма выполняется с помощью итерационной процедуры. При этом возрастной состав и количество трески-хищника берутся по модели SAM. Далее по данным о потреблении 1 экз. и численности хищника рассчитывается численность трески-жертвы и коэффициенты смертности от каннибализма для каждого года и возраста (3-6 лет). Делается повторный прогон. Процедура повторяется до минимизации разницы в оценках коэффициентов смертности с соответствующим результатом расчетов на предыдущей итерации (Kovalev, Bogstad, Yaragina, 2021).

Использованы методы прогнозирования биологических показателей, согласованные на AFWG и описанные в инструкции для оценки запаса СВА трески, – Stock Annex (Kovalev, Bogstad, Yaragina, 2021). Для прогнозирования массы рыб применен метод К. Брандера (Brander, 2003), основанный на среднегодовых приростах массы рыб разного возраста, осредненных за разное (3, 5 или 10) количество лет.

Для прогнозирования массы (W) рыб старшего возраста (12-15 лет) использован метод Л. фон Берталанфи (von Bertalanffy, 1957). В качестве входных данных взята средняя масса в возрасте 3-11 лет для каждого поколения:

$$W = W_{\infty} \times (1 - e^{-K \times (t - t_0)})^3,$$

где t – время (год);

t_0 – момент времени, когда масса рыбы равнялась нулю;

K – коэффициент роста;

W_{∞} – предельная масса рыбы.

Данное уравнение предполагает, что между массой и длиной рыб существует связь вида: $W = a \cdot L^b$, где L – длина рыбы, a и b – коэффициенты. Значение коэффициента b протестировано на имеющихся данных и подтверждено, что его можно принять равным 3. Это значение было зафиксировано в дальнейших расчетах. Было принято допущение об отсутствии изменчивости коэффициента a , т.е. о его независимости от плотности популяции/численности поколения, который при формулировании уравнения был проигнорирован (принят равным единице).

Оценка параметров уравнения выполнялась с использованием значений средней массы трески в возрасте 3-11 лет для каждого поколения отдельно. Значения параметров t_0 и W_{∞} были приняты постоянными для

всего периода наблюдений (1984-2020 гг.), а при их оценке некоторые поколения с зашумленными данными были исключены. Параметр K оценивался как зависящий от численности поколения, принимаемой в качестве индикатора плотности популяции. Вычисления и подбор параметров выполнялись при помощи надстройки Solver в программе Microsoft Excel.

Сравнение прогнозируемых величин средней массы, рассчитанных разными методами, производилось на ретроспективном материале, чтобы показать, какой метод давал наиболее точные результаты.

За показатель теплосодержания водных масс Баренцева моря принята температура воды в слое 0-200 м на ст. 3-7 разреза «Кольский меридиан» (<http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij>), которая является хорошим индикатором интенсивности адвекции атлантических вод из Норвежского моря (Бочков, 1982; Voitsov, Karsakov, Trofimov, 2012; Восстановление данных по..., 2018). Общая биомасса запаса мойвы и биомасса половозрелой мойвы оценивались по данным ежегодной российско-норвежской специализированной тралово-акустической съемки, выполняемой в августе-сентябре в Баренцевом море (Arctic Fisheries Working..., 2021). В ряде случаев использовался лаг в 1 год в данных о биомассе/численности мойвы и трески, т.е. данные за предыдущий год о биомассе относительно данных средней массы для учета инерционности биологических процессов (роста).

Средние показатели по годам рассчитывали с помощью программы Microsoft Excel 2016. Статистические характеристики связи между различными показателями получены в программе Statistica 13.3; при этом вычислялись коэффициент детерминации, уровень значимости (p) и критерий Стьюдента (t).

Модели множественной линейной регрессии получены в программе Statistica 13.3 с помощью пошаговой регрессии. Предикторы (количеством от 1 до 5) отбирались в финальное регрессионное уравнение методом включения при условии превышения F -критерием Фишера 1,0.

ПРОГНОЗ МАССЫ РЫБ В ЗАПАСЕ

Популяция СВА трески обитает на северной границе ареала вида с довольно низкими температурами, поэтому ее можно отнести к средне- или медленно растущим популяциям трески (Brander, 1994, 1995). В Баренцевом море особи достигают средней массы около 1 кг к возрасту 4 года, а массы около 3 кг – примерно к возрасту 7 лет (табл. 1). Тем не менее СВА треске присущи большие вариации массы рыб одного и того же возраста/поколения, т.е. в популяции могут быть экземпляры как с медленным, так и с быстрым темпом роста. Главным образом это

характерно для рыб старше 10 лет, где максимальные значения массы могут превышать минимальные в 2,4-2,6 раза. Коэффициент вариации средней массы трески особенно высок у рыб в возрасте 3-4 лет, т.е. у рыб в возрасте пополнения, когда треску начинают облавливать промыслом. Минимальный коэффициент вариации наблюдается у рыб в возрасте 7-8 лет, затем он вновь повышается с увеличением возраста (см. табл. 1).

Таблица 1

Статистическая характеристика рядов данных о средней массе СВА трески по возрастам в запасе за 1946-2021 гг.

Показатель	Возраст, лет								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длина ряда	76	76	76	76	76	76	76	76	76
Среднее, кг	0,32	0,67	1,23	2,02	3,05	4,39	5,99	7,94	9,55
Медиана, кг	0,32	0,62	1,19	1,99	3,02	4,35	5,95	7,79	9,36
Дисперсия, кг ²	0,01	0,03	0,05	0,09	0,17	0,37	0,79	1,97	3,25
Максимум, кг	0,52	1,17	1,82	2,82	4,06	5,83	8,55	12,11	14,29
Минимум, кг	0,15	0,40	0,79	1,48	2,14	2,92	3,65	4,56	5,84
Коэффициент вариации, %	27,33	24,76	17,75	14,43	13,54	13,91	14,88	17,66	18,87
Стандартная ошибка, кг	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07	0,10	0,16	0,21
Асимметрия	0,27	1,11	0,78	0,92	0,47	0,07	-0,09	0,16	0,31
Экссесс	-0,73	1,06	0,63	1,05	0,15	-0,07	0,65	0,63	0,50

До начала регулярных инструментальных съемок запасов СВА трески в Баренцевом море Россия и Норвегия (1946-1982 гг.) из-за недостатка материалов использовали в работах фиксированные величины средней массы рыб по возрастам, хотя неоднократно предпринимались попытки применять более близкие к реальным изменяющиеся значения (Jakobsen, 1993; Recruitment variability and..., 1994; Nakken, 1994; Треска Баренцева моря..., 1996). Фактические данные съемок, применяющиеся с 1983 г., показали значительные колебания длины и массы одновозрастных рыб по годам (Ковалев, Ярагина, 2009). Эта диспропорция между историческими и современными сведениями была устранена в 2001 г., когда ученые БИМИ и ПИНРО, проанализировав и обобщив архивные материалы, представили на AFWG 2001 г. обновленные временные ряды о массе и половозрелости рыб в исторический период (Report of the..., 2001), которые затем стали использоваться при оценках запаса.

Для прогнозирования массы рыб по возрастам с заблаговременностью 1-2 года применялась сначала просто средняя масса за 3 предшествующих года, однако практика показала, что они весьма инерционны и не всегда хорошо отражают динамику этих показателей через 1-3 года, особенно в случае быстрого изменения экологической ситуации (например, снижения/увеличения численности кормовых объектов или самого хищника

и соответствующего изменения темпа роста трески). Так, например, в мае 1988 г. на заседании СРНК ОДУ трески на текущий год был пересмотрен с 550 до 491 тыс. т в связи со снижением запаса трески, частично обусловленным уменьшением средней массы рыб (Треска Баренцева моря..., 1996), что совпало с коллапсом запаса мойвы – основного объекта питания трески (Gjøsaeter, Dommasnes, Røttingen, 1998).

Позднее было предложено использовать метод К. Брандера (Brander, 2003), учитывающий годовые приросты рыб по возрастным группам, осредненные за ряд лет, так как он показал бóльшую эффективность при прогнозировании. В данном методе приросты прибавлялись к средней массе рыб меньшего на 1 год возраста, т.е. учитывалась как более консервативная часть показателя (уже достигнутая масса), так и более изменчивая часть (прирост, зависящий предположительно от кормовых условий, соотношения численности хищников и жертв в водоеме, климатических условий и др.). На примере 1980-х годов показано, что спрогнозированная по методу Брандера (по приростам) масса рыб более близка к фактическим: отклонения чаще всего не превышали 20 % и редко были очень большими (рис. 2).

Этот метод удовлетворительно работал для большинства возрастных групп, однако для рыб старше 11 лет из-за недостатка данных и их неравномерного распределения по районам (что вполне объяснимо в силу редкости или отсутствия таких рыб в уловах) он приводил к резким колебаниям – пикам на кривых средней массы по годам, а иногда и к отрицательным приростам. Для устранения этого несоответствия с 2006 г. средняя масса рыб в возрасте 12-15 лет для периода 1983-2020 гг. принималась постоянной, рассчитанной за многолетний период (Arctic Fisheries Working..., 2020), но начиная с 2018 г. эта величина оказалась заметно выше фактической, наблюдаемой в съемках (рис. 3).

Метод расчета средней массы в запасе с использованием уравнения Бергаланфи был предложен нами на семинаре ИКЕС (Benchmark Workshop for..., 2021) для старших возрастных групп (12-15+ лет). Он позволил уменьшить отклонения между применяемыми в оценках и наблюдаемыми величинами и более точно прогнозировать указанные биологические параметры (см. рис. 3). Этот подход с 2021 г. был использован Рабочей группой ИКЕС для «восстановления» массы старших возрастных групп, ранее представленных как константы, и их замены на данные, полученные по аналогичной функции, настроенной на значения средней массы младших возрастов.

Для сугубо практических целей прогнозирования СВА трески в настоящее время (Report of the..., 2023) применяются два наиболее хорошо зарекомендовавших себя подхода: для прогнозирования средней массы рыб

в возрасте 3-11 лет – метод Брандера, учитывающий годовые приросты рыб за 3 последних года, а для прогнозирования средней массы рыб в возрасте 12-15 лет – метод Берталанфи, адаптированный нами с учетом фактических данных для определения параметров уравнения.

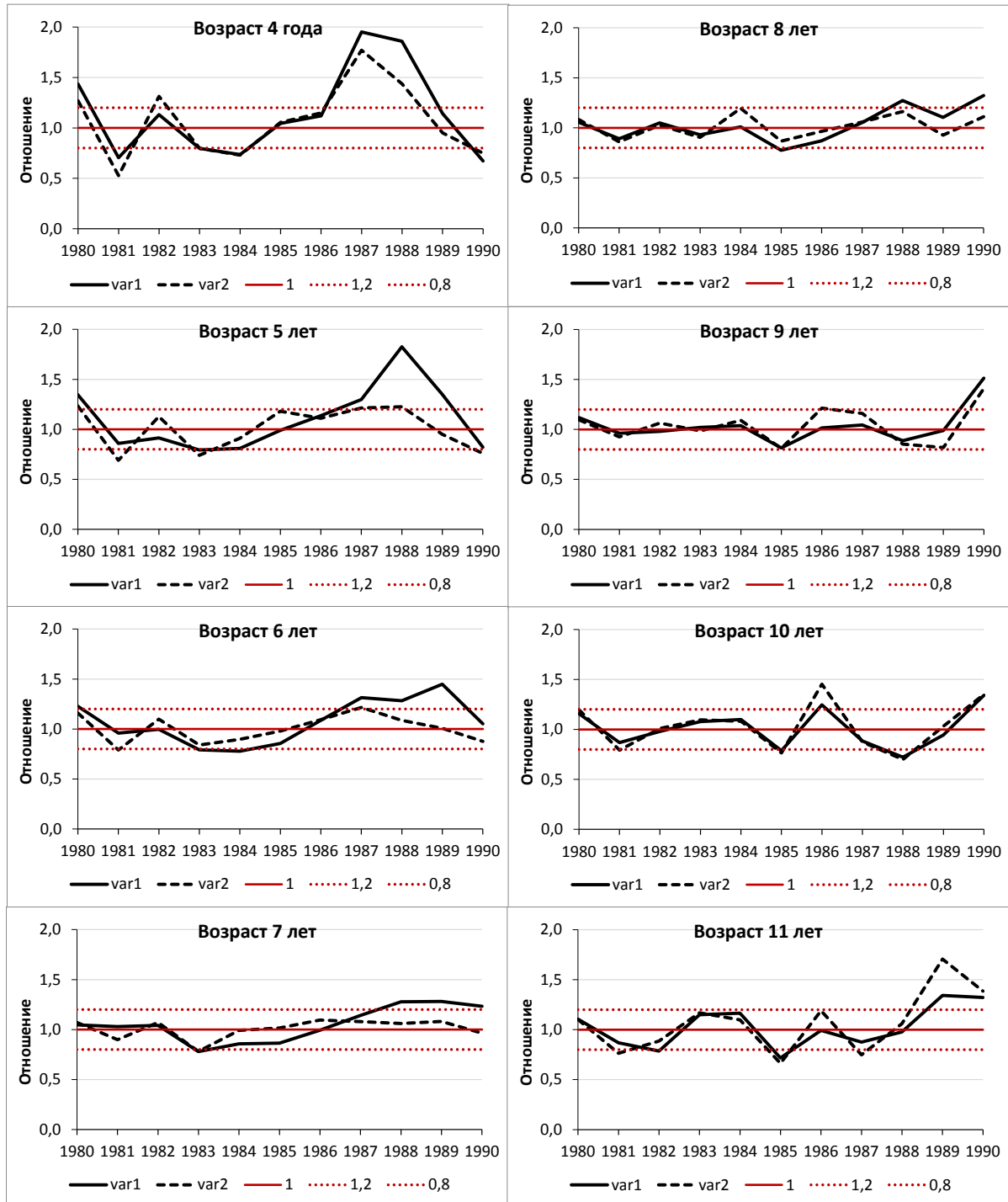


Рис. 2. Соотношение между прогнозируемой и фактической средней массой трески по возрастам по двум вариантам прогноза: var1 – по средней массе за 3 последних года; var2 – по средним приростам за 3 последних года (пример приведен для 1980-1990 гг.)

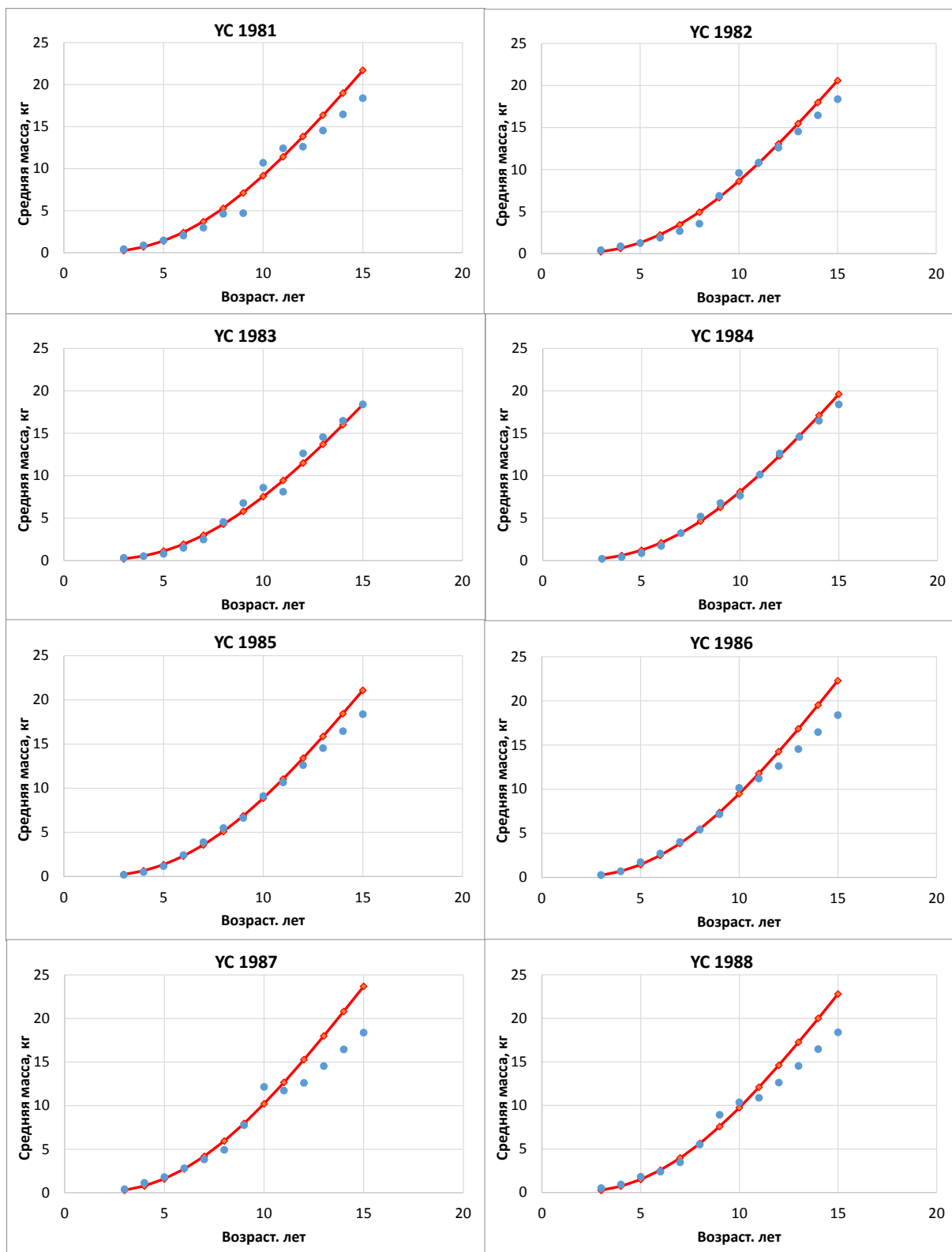


Рис. 3. Средняя масса трески по возрастам в запасе по поколениям (УС) и результаты сглаживания этих данных (для рыб в возрасте 3-11 лет) с использованием уравнения роста Бергаланфи. Синие точки – фактические данные для рыб в возрасте 3-11 лет и фиксированные данные для рыб старше 11 лет (представлены для сравнения); красные точки и линии – сглаженные по уравнению данные

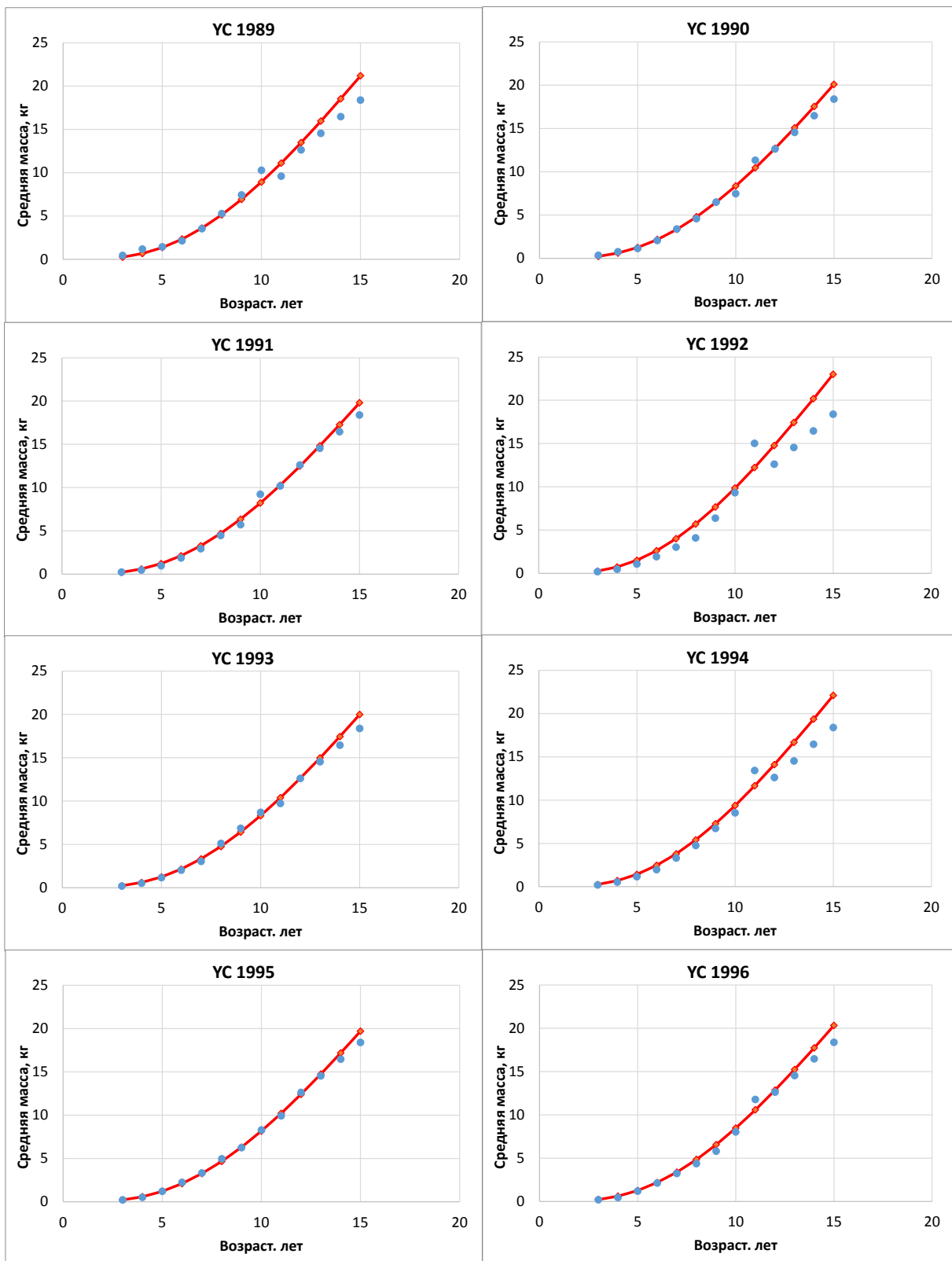


Рис. 3. Продолжение

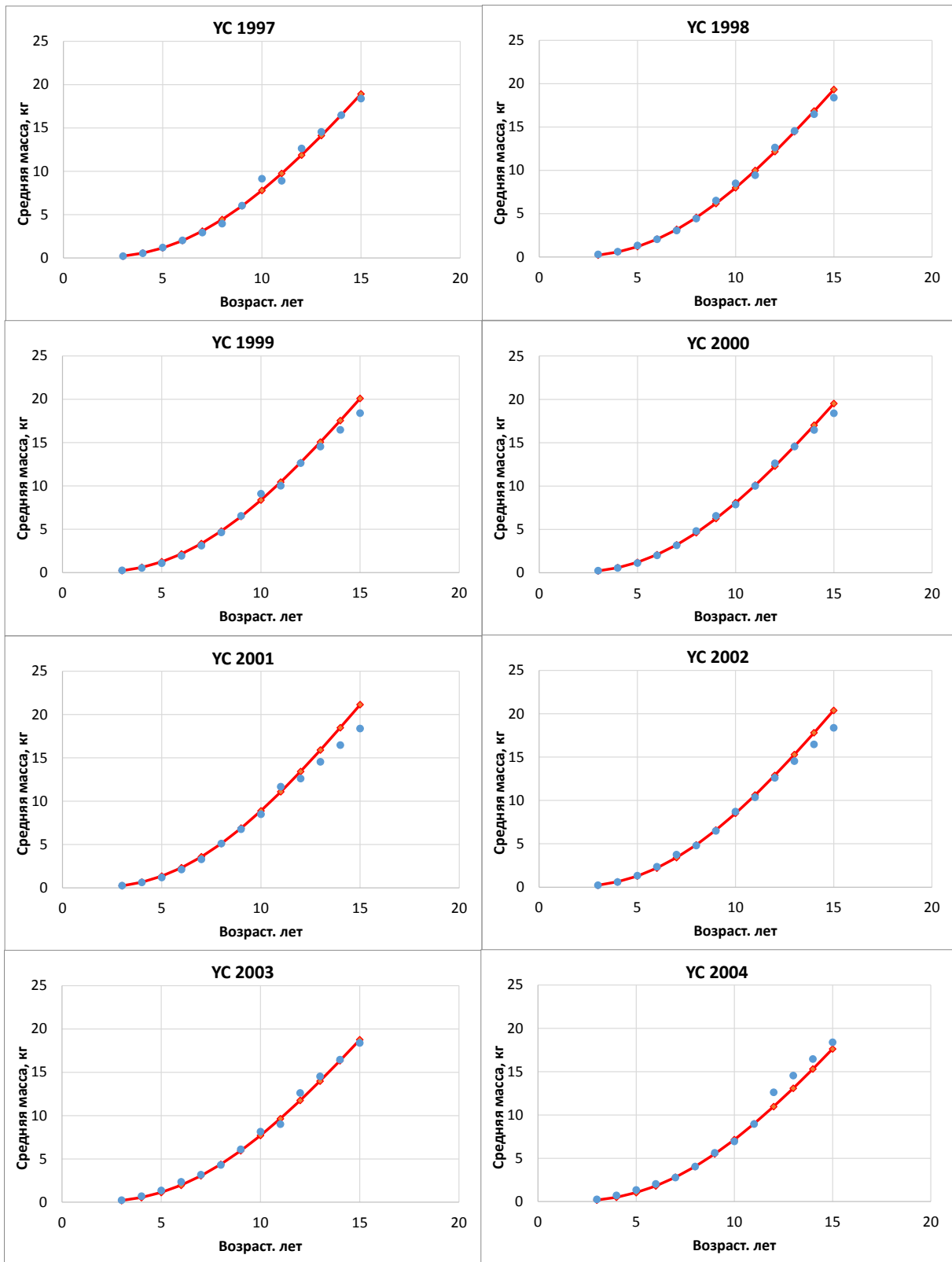


Рис. 3. Продолжение

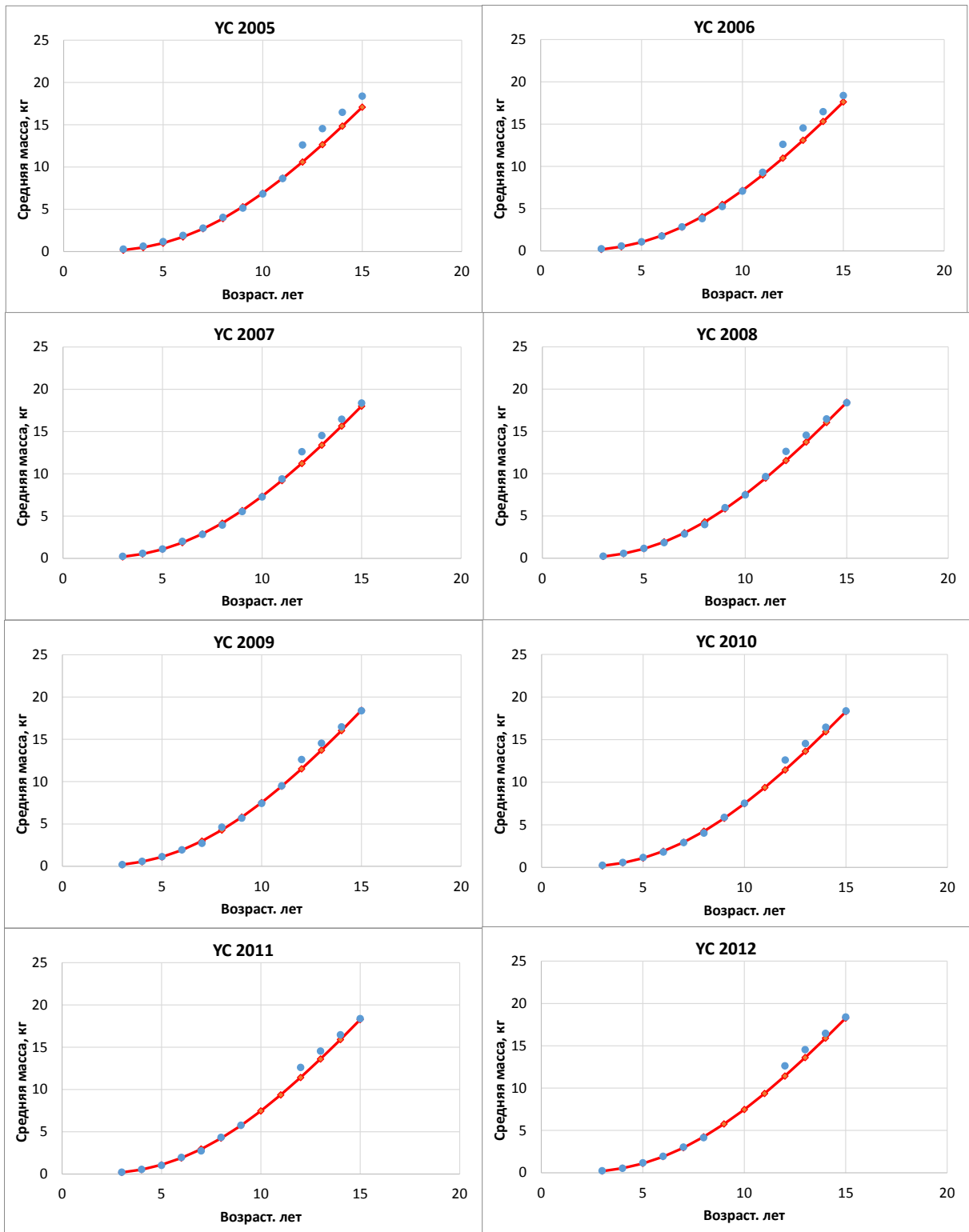


Рис. 3. Окончание

Имея подробные данные об экосистеме Баренцева моря, следует рассмотреть проблему роста рыб также с теоретической точки зрения. Актуальным остается вопрос прогнозирования и моделирования темпа роста рыб с учетом некоторых экологических, т.е. биотических и абиотических факторов (например, температуры воды, плотности популяции трески и т.д.). Такие исследования предпринимались неоднократно (Recruitment variability and..., 1994; Зависимость роста аркто-норвежской..., 1995; Ковалев, Ярагина, 2009). Несмотря на имеющиеся результаты, регрессионные модели, описывающие связь темпа роста и факторов среды, пока не вошли в практику краткосрочного прогнозирования AFWG. Дело в том, что они требуют постоянного обновления при получении новых материалов об оценке запаса самой СВА трески и объектов ее питания, биотических и абиотических данных, и все это должно проходить оперативно во время проведения заседания AFWG, где возникают более острые проблемы, требующие обсуждения и незамедлительного решения. Однако эти модели могут быть использованы для понимания процессов, происходящих в экосистеме, а также для долгосрочного прогнозирования, демонстрации различных сценариев динамики биологических характеристик запаса при разных климатических ситуациях в Баренцевом море. Здесь мы приводим несколько обновленных моделей, которые описывают зависимость средней массы СВА трески от ряда биотических и абиотических параметров (табл. 2, 3, рис. 4), полученных с помощью пошаговой регрессии.

Наиболее значимыми параметрами для включения в прогностические уравнения для всего периода с 1946 по 2020 г. (75 лет) были следующие: масса рыб одного и того же поколения в предшествующем году (W_{agen-1} , $y-1$), общая биомасса запаса трески (TSB), численность смежных поколений и в отдельных случаях – текущего поколения (N_{agen-1} , N_{agen+1} , N_{agen}). Масса рыб в предшествующем году положительно влияла на массу рыб в текущем году; биомасса запаса трески и численность смежных поколений оказывали отрицательное воздействие на массу рыб в возрасте n . Температура воды в слое 0-200 м (Т) была незначимым или малозначимым параметром, даже если и включалась в уравнение в ходе пошаговой регрессии (см. табл. 2).

Для современного периода 1972-2020 гг. (49 лет), дополнительно обеспеченного данными об оценках запаса баренцевоморской мойвы, были составлены уравнения, включающие и этот дополнительный параметр (см. табл. 3); он оказался наиболее значим для рыб в возрасте 3-4 лет. В целом наибольшие парные корреляции отмечались для показателей массы рыб одного и того же поколения в предыдущем и текущем годах (см. рис. 4), и таким образом именно они вносили наибольший вклад в коэффициент

детерминации, т.е. долю объясненной изменчивости. Изменение коэффициента детерминации при пошаговом включении в уравнение новых параметров показано в табл. 4 на примере одной зависимой переменной – массы рыб в возрасте 7 лет. Видно, что при включении второй и третьей независимых переменных (биомассы мойвы и температуры воды на разрезе «Кольский меридиан») коэффициент детерминации увеличивается незначительно.

Таблица 2

Характеристика множественной линейной регрессии между средней массой трески в возрасте n (3-10) лет в запасе (Wage) и разными предикторами: средней массой трески в возрасте $n-1$ в предыдущем году, общей биомассой запаса трески (TSB), среднегодовой температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0-200 м (ст. 3-7) (T), численностью трески (N) в возрасте n и смежных $n-1$ и $n+1$ (1946-2020 гг.)

Зависимая переменная	Предикторы	Независимая переменная	Коэффициент детерминации уравнения	Значение р-критерия	a, свободный член уравнения	b, коэффициент уравнения
Wage3	1	T	0,206	<0,001	0,573***	-0,067***
	2	TSB		0,163		1,87E-08
	3	N3		0,271		2,36E-08
	4	N4		0,114		-5,87E-08
Wage4	1	Wage3y-1	0,430	<0,001	0,367***	1,165***
	2	Nage5		0,01		-2,02E-07**
Wage5	1	Wage4y-1	0,741	<0,001	0,377***	1,091***
	2	Nage6		0,029		-2,55E-07*
	3	T		0,092		0,041
Wage6	1	Wage5y-1	0,70	<0,001	0,633**	1,045***
	2	TSB		0,057		-6,07E-08
	3	Nage5		0,191		1,61E-07
	4	Nage7		0,159		-4,68E-07
	5	T		0,136		0,057
Wage7	1	Wage6y-1	0,777	<0,001	0,978***	1,124***
	2	TSB		0,003		-9,60E-08**
	3	Nage6		0,103		4,16E-07
	4	Nage7		0,150		-6,11E-07
Wage8	1	Wage7y-1	0,765	<0,001	0,917*	1,192***
	2	TSB		0,177		-7,50E-08
	3	Nage7		0,312		5,84E-07
	4	Nage9		0,138		-2,47E-06
Wage9	1	Wage8y-1	0,748	<0,001	1,861**	1,039***
	2	TSB		0,017		-1,97E-07*
	3	Nage8		0,264		1,62E-06
	4	Nage10		0,082		-5,65E-06
Wage10	1	Wage9y-1	0,777	<0,001	-0,104	1,229***
	2	TSB		0,141		-1,68E-07
	3	Nage11		0,193		-0,000011
	4	T		0,079		0,271

Примечание – значимые коэффициенты/предикторы (для 75 лет наблюдений) выделены жирным шрифтом: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Таблица 3

Характеристика множественной линейной регрессии между средней массой трески в возрасте n (3-10) лет в запасе (Wage) и разными предикторами: средней массой трески в возрасте $n-1$ в предыдущем году, общей биомассой запаса трески (TSB), среднегодовой температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0-200 м (ст. 3-7) (T), численностью трески (N) в возрасте n и смежных $n-1$ и $n+1$ (1972-2020 гг.), биомассой запаса мойвы с лагом 1 год (TSBcap)

Зависимая переменная	Предикторы	Независимая переменная	Коэффициент детерминации уравнения	Значение р-критерия	а, свободный член уравнения	б, коэффициент уравнения
Wage3	1	TSBcap	0,633	<0,001	0,304***	0,000029***
	2	TSB		<0,001		-3,78E-08***
	3	N4		0,186		-4,82E-08
Wage4	1	Wage3y-1	0,561	0,002	0,432***	0,868**
	2	Nage5		0,017		-3,05E-07*
	3	TSBcap		0,026		0,000024*
Wage5	1	Wage4y-1	0,805	<0,001	0,592***	1,061***
	2	Nage6		0,094		-2,64E-07
Wage6	1	Wage5y-1	0,786	<0,001	0,703***	1,120***
	2	Nage7		0,030		-8,12E-07*
	3	TSBcap		0,109		-0,000018
	4	TSB		0,102		5,67E-08
Wage7	1	Wage6y-1	0,792	<0,001	1,237***	1,201***
	2	TSBcap		0,006		-0,000038**
	3	T		0,025		-0,106854*
Wage8	1	Wage7y-1	0,805	<0,001	2,137***	1,020***
	2	TSB		0,008		1,79E-07**
	3	TSBcap		0,022		-0,00004*
	4	Nage9		0,015		-4,12E-06*
	5	T		0,006		-0,214**
Wage9	1	Wage8y-1	0,613	<0,001	4,010***	0,792***
	2	TSBcap		0,087		-0,000056
	3	T		0,083		-0,240
	4	Nage10		0,138		-7,16E-06
Wage10	1	Wage9y-1	0,588	<0,001	1,663	1,102***
	2	Nage11		<0,001		-0,000023

Примечание – значимые коэффициенты/предикторы (для 49 лет наблюдений) выделены жирным шрифтом: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Результаты данной работы в целом подтверждают результаты исследований, проводившихся ранее. Наиболее значимыми факторами, влияющими на темп роста трески, разными авторами признавались различные показатели. В условиях эксперимента при избытке пищи было показано, что бóльший темп роста трески наблюдается при 12 °C (Jobling, 1988), при снижении рациона температурный оптимум сдвигается в сторону низких температур (Elliott, 1975). Причина такого сдвига состоит в уменьшении величины поддерживающего рациона при низких температурах, которое делает возможным расходование значительной части потребленной пищи на рост. Специфические темпы роста СВА трески

массой 200, 500 и 2000 г, выращиваемой при 8,5 °С, составляли 0,89; 0,59 и 0,32 % в день соответственно (Braaten, 1984), что сходно с такими же показателями у исландской трески (0,71; 0,51; 0,31 % в день) (Björnsson, Steinarsson, 2002). Треска в естественных условиях столь высоких показателей темпа роста, как в условиях эксперимента, не демонстрирует, т.е. ее темп роста во многом лимитируется кормовыми условиями водоема.

Температура воды особенно часто изучается в связи с темпами роста рыб (пойкилотермных животных) как потенциально наиболее значимая для них, а также регулярно измеряемая (Brander, 1995). Т.Ф. Дементьева и Э.М. Манкевич (Dementyeva, Mankevich, 1965) отмечали хорошую согласованность между средними размерами трески в отдельные годы (1934-1960 гг.) и суммой температур в сезоны нагула за период жизни особей, указывая на первостепенную роль температурных условий в скорости роста трески. Согласно выводам В.К. Ожигина с соавторами (Зависимость роста аркто-норвежской..., 1995), основанным на данных 1949-1993 гг., наилучшая связь между температурой и размером трески наблюдалась для рыб в возрасте 3-5 лет при суммировании (осреднении) температуры за 2 предшествующих года ($r = 0,53-0,60$). Длина 6-7-летней трески наилучшим образом коррелировала с температурой, осредненной за 3 предшествующих года ($r = 0,52-0,56$). У рыб в возрасте 8-9 лет наибольшая корреляция ее длины с температурой ($r = 0,49-0,51$) отмечалась при осреднении последней за 4 года, предшествующих вылову. По аналогии с работой В.К. Ожигина с соавторами (Зависимость роста аркто-норвежской..., 1995), мы сравнили связи, но не длины, а массы трески в запасе с температурой за более длительный период (включая годы после 1993 г.). Оказалось, что статистически значимых зависимостей для всего периода (1946-2020 гг.) не отмечено, за исключением слабой обратной зависимости массы рыб в возрасте 3 лет от средней температуры за 2 предшествующих года ($r = -0,29$, $n = 72$). Потепление в регионе Баренцева и сопредельных морей, которое наблюдается с начала 2000-х годов (Восстановление данных по..., 2018), не способствовало увеличению средней массы рыб, поскольку это не единственный влияющий фактор, тем более что при повышении температуры воды увеличиваются величины поддерживающего рациона, а в случае СВА трески – и протяженность нагульных миграций (Global imprint of..., 2013; Projecting shifts in..., 2018; Little, Loughland, Seebacher, 2021; Распределение трески в..., 2023). Более значимым для современного периода оказалось влияние плотности и конкуренции за пищевые ресурсы между разными размерными/возрастными группами в популяции трески. Так, в 2008-2018 гг. запас трески значительно вырос и был намного выше среднемноголетнего уровня, что, видимо, снизило обеспеченность трески

пищей (Barents Sea cod..., 2019; Working Group on..., 2020; Борисов, Тарантова, Крылова, 2018). Биомасса общего запаса трески отрицательно коррелировала с массой рыб, особенно значимым было влияние численности смежных поколений (см. табл. 2, 3, рис. 4).

Условия откорма имеют немаловажное значение в регулировании темпа роста (Elliott, 1975), и для запаса СВА трески в качестве индекса кормовой обеспеченности обычно используют численность мойвы (Зависимость роста аркто-норвежской..., 1995). Это вполне логично, так как мойва – основной объект питания трески в Баренцевом море (Зацепин, Петрова, 1939; Piscivorous fish, 2011; Diets of the..., 2021), однако следует отметить, что величина запаса мойвы подвержена значительным колебаниям (Gjøsæter, 1998; Gjøsæter, Dommasnes, Røttingen, 1998). Ранее было показано, что коэффициенты корреляции между численностью 3-4-летней мойвы и длиной трески для 1973-1993 гг. у разных возрастных групп изменялись от 0,47 до 0,70, т.е. длина 4-9-летней трески во многом зависит от успешности откорма мойвой в предшествующие 1-3 года, в зависимости от возраста самой трески (Зависимость роста аркто-норвежской..., 1995). Согласно нашим данным за более длительный 48-летний период (1973-2020 гг.), коэффициенты парной корреляции между массой рыб в текущем году и биомассой запаса мойвы в предшествующем году уменьшались с 0,69 у трески в возрасте 3 лет до 0,37 у трески в возрасте 6 лет; у более старшей трески коэффициенты корреляции были незначимыми.

Зависимость массы рыб от плотности популяции также вполне обычна для биологических объектов. Считается, что компенсаторная зависимость от плотности у большинства морских рыб проявляется обычно в раннем возрасте и, как правило, описывается соотношениями между биомассой производителей и количеством рекрутов в моделях рыболовства (например, Ricker, 1954; Beverton, Holt, 1993). Это предположение справедливо для многих популяций (Lorenzen, Camp, 2018; Zimmermann, Ricard, Heino, 2018), хотя зависимость от плотности у некоторых популяций может также иметь место в более позднем возрасте (When in life..., 2017). У ряда морских рыб, в том числе у трески, рост, определяющийся плотностью популяции, часто наблюдается при переходе от пелагического к демерсальному образу жизни (Density- and size-..., 2019). Ранее также было показано, что темп роста смежных поколений зависит от их численности, поскольку они наиболее тесно связаны сходством кормовых объектов и характером сезонных миграций (Ковалев, Ярагина, 2009). Данные настоящей работы показывают негативное влияние плотности популяции на среднюю массу рыб, особенно это касается численности смежных поколений, которые старше исследованных на 1 год (см. табл. 2, 3).

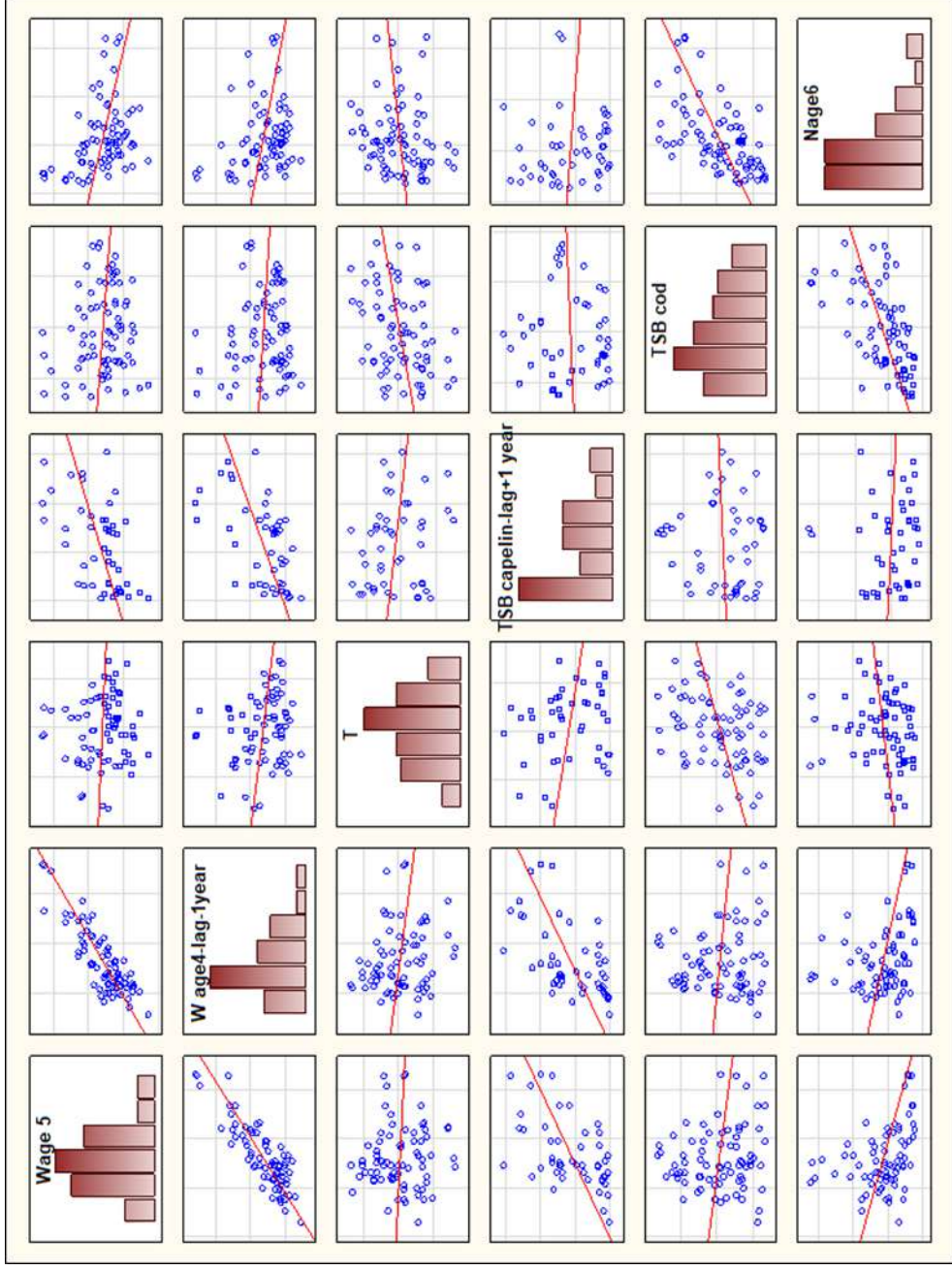


Рис. 4. Парные корреляции зависимости зависимой переменной – массы рыб в возрасте 5 лет (Wage5) с независимыми переменными – массой рыб в предшествующем году/возрасте (Wage4-lag-1year), температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» (T), биомассой запаса мойвы в предшествующем году (TSBcapelin-lag+1year), общей биомассой запаса трески (TSBcod), численностью смежного поколения трески в возрасте 6 лет (Nage6)

**Характеристика пошаговой регрессии для зависимой переменной – массы рыб
в возрасте 7 лет (по данным 1972-2020 гг.)**

Переменная	Шаг	Множественные R ²	Изменение R ²	F	Значение р- критерия	Включено переменных
Wage6-lag-1year	1	0,733	0,733	123,6981	<0,001	1
TSBcapelin- lag+1year	2	0,766	0,032	6,0907	0,018	2
T	3	0,792	0,026	5,3517	0,026	3

Примечание – значимые коэффициенты/предикторы выделены жирным шрифтом.

ПРОГНОЗ МАССЫ РЫБ В УЛОВЕ

Для прогноза массы рыбы в улове применимы те же закономерности, что и для прогноза ее массы в запасе. Основное отличие здесь заключается в используемых данных. С 1983 г. средняя масса по возрастам в уловах рассчитывается как средневзвешенное значение по уловам в районах ИКЕС (1, 2a и 2b) разных стран, предоставляющих информацию по возрастному составу выловленных рыб. Обычно такие сведения регулярно дают Россия, Норвегия, Германия, Испания и нерегулярно – Польша, Исландия, Великобритания. Для более раннего периода (1946-1982 гг.) средняя масса по возрастам в уловах принималась равной средней массе по возрастам в запасе (Report of the..., 2001).

При прогнозировании средней массы трески в уловах используется иной период осреднения величин прироста, чем при прогнозировании массы рыб в запасе. Это связано с особенностями данных, которые нуждаются в бóльшем сглаживании, поскольку величины средней массы в уловах, представляемых разными странами, более зашумлены и иногда довольно значительно различаются (Arctic Fisheries Working..., 2021). Частично это зависит от различия в методиках определения возраста в лабораториях разных стран, в отличие от России и Норвегии, которые регулярно проводят сравнения по определению возраста трески и пикши (Age determination of..., 2009). До 2021 г. период осреднения составлял 10 лет, с 2021 г. он принят равным 5 годам (Benchmark Workshop for..., 2021, а именно WD 28: Exploring new approaches to define weight at age in the commercial catches in the NEA cod shortterm forecast / A. Perez-Rodriguez.).

ПРОГНОЗ ДОЛИ ПОЛОВОЗРЕЛЫХ РЫБ ПО ВОЗРАСТАМ

Половое созревание трески начинается в возрасте 3 лет, однако доля половозрелых рыб в этом возрасте крайне низка (табл. 5, 6). Примерно

половина популяции созревает к возрасту 8 лет, и с возраста 11 лет практически все особи – половозрелые. Колебания доли половозрелых рыб по отдельным годам весьма велики, коэффициент вариации этого показателя особенно высок у рыб младшего возраста (3-5 лет). На основании наших данных за продолжительный исторический период (76 лет) можно отметить тенденцию к увеличению доли половозрелых особей СВА трески по возрастам, особенно для рыб 6-8 лет.

При оценке запаса для расчета доли половозрелых рыб по возрастам на ближайшие 2-3 года (краткосрочный прогноз) используются средние значения доли половозрелых рыб за последние 3 года, поскольку анализ результатов показал, что они наиболее близки к фактическим данным.

Рассматривались также варианты прогноза с осреднением долей половозрелых рыб за другие периоды, но увеличение периода осреднения приводит к усилению инерции, нивелированию противоположных сигналов в динамике темпа роста и созревания из-за ситуации в экосистеме и в итоге к снижению оправдываемости прогноза, а прогноз с осреднением за 1-2 года больше подвержен влиянию случайных отклонений (шуму в данных).

Таблица 5

Статистическая характеристика рядов данных о доле половозрелых рыб СВА трески по возрастам в запасе за 1946-2021 гг.

Показатель	Возраст, лет								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длина ряда	76	76	76	76	76	76	76	76	76
Среднее значение ряда	0,001	0,007	0,035	0,155	0,344	0,542	0,705	0,838	0,922
Медиана	0,000	0,000	0,014	0,096	0,271	0,595	0,821	0,955	0,990
Дисперсия	5E-06	2E-04	2E-03	2E-02	7E-02	9E-02	8E-02	4E-02	1E-02
Максимум	0,010	0,080	0,180	0,438	0,800	0,943	1,000	1,000	1,000
Минимум	0,000	0,000	0,000	0,010	0,030	0,090	0,100	0,220	0,500
Коэффициент вариации, %	303,9	206,9	111,3	90,2	74,9	55,1	39,7	23,6	12,4
Стандартная ошибка	0,000	0,002	0,004	0,016	0,030	0,034	0,032	0,023	0,013
Асимметрия	3,4	3,2	1,4	0,6	0,2	-0,2	-0,6	-1,3	-1,6
Экссесс	11,0	11,3	1,7	-1,3	-1,6	-1,7	-1,0	0,7	2,1

Как альтернатива инерционному методу прогноза (осреднение данных за предшествующий период) могут быть использованы регрессионные модели зависимости скорости созревания (доли половозрелых рыб по возрастам) от плотности популяции. Такие модели были построены при тестировании стратегии управления запасом трески (Report of the..., 2016), однако прогноз по этим моделям показал более низкую оправдываемость, и они не используются при расчете ОДУ.

Таблица 6

Статистическая характеристика рядов данных о доле половозрелых рыб СВА трески по возрастам в запасе за 1982-2021 гг.

Показатель	Возраст, лет									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Длина ряда	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Среднее значение ряда	0,001	0,012	0,058	0,265	0,566	0,803	0,926	0,976	0,997	1,000
Медиана	0,000	0,005	0,061	0,303	0,556	0,840	0,955	0,990	1,000	1,000
Дисперсия	6E-06	3E-04	2E-03	1E-02	2E-02	1E-02	8E-03	2E-03	6E-05	6E-05
Максимум	0,010	0,080	0,180	0,438	0,800	0,943	1,000	1,000	1,000	1,000
Минимум	0,000	0,000	0,002	0,057	0,220	0,460	0,500	0,750	0,959	0,959
Коэффициент вариации, %	225,3	151,6	69,8	39,8	24,2	12,7	9,9	4,5	0,8	0,8
Стандартная ошибка	0,000	0,003	0,006	0,017	0,022	0,016	0,015	0,007	0,001	0,001
Асимметрия	2,6	2,3	0,7	-0,3	-0,7	-1,4	-3,6	-3,9	-3,2	-3,2
Эксцесс	5,7	5,4	0,7	-1,2	0,3	2,3	14,2	18,6	12,3	12,3

ПРОГНОЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ СМЕРТНОСТИ ПО ПРИЧИНЕ КАННИБАЛИЗМА

Коэффициенты естественной смертности СВА трески по причине каннибализма наиболее велики у рыб в возрасте 3 лет (табл. 7) и постепенно снижаются к возрасту 6 лет. При этом они подвержены значительным межгодовым колебаниям: минимальные значения могут отличаться от максимальных в 2-2,5 раза. Коэффициент вариации этого показателя особенно высок у рыб младшего возраста (3 года).

Таблица 7

Статистическая характеристика рядов данных о коэффициентах естественной смертности по причине каннибализма СВА трески в возрасте 3-6 лет за 1984-2021 гг.

Показатель	Возраст, лет			
	3	4	5	6
Длина ряда	38	38	38	38
Среднее значение ряда	0,302	0,235	0,216	0,213
Медиана	0,271	0,222	0,210	0,206
Дисперсия	0,0086	0,0013	0,0004	0,0003
Максимум	0,530	0,327	0,264	0,271
Минимум	0,2	0,2	0,2	0,2
Коэффициент вариации, %	30,7	15,3	8,8	8,3
Стандартная ошибка	0,015	0,006	0,003	0,003
Асимметрия	0,87	1,16	0,90	1,85
Эксцесс	-0,13	0,38	-0,45	3,74

Коэффициенты естественной смертности трески (для возрастов 3-6 лет) прогнозируются на ближайшие годы (краткосрочный прогноз) как средние значения за 3 предшествующих года. Однако если в последние годы наблюдается сильный тренд на увеличение или уменьшение этих показателей, то их прогнозируемые величины устанавливаются равными значениям, рассчитанным за предшествующий год.

Для прогноза уровня каннибализма на ближайшие годы были протестированы те же дополнительные подходы, что и для ожив половозрелости. Рассматривались альтернативные варианты прогноза уровня каннибализма с осреднением за другие периоды и на основе регрессионных моделей зависимости коэффициентов естественной смертности от плотности популяции. Но результаты сравнения показали, что, как и в случае с оживами, бóльшую оправдываемость имел метод осреднения за 3 последних года, который и используется при оценке ОДУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод расчета средней массы СВА трески в запасе и уловах с использованием уравнения Берталанфи, настроенного на наблюдаемые значения, показал свою эффективность и может использоваться для сглаживания зашумленных данных, восстановления отсутствующих значений и прогноза с заблаговременностью 1-3 года. Метод был рассмотрен на семинаре ИКЕС (Benchmark Workshop for..., 2021) и принят для применения при оценке ОДУ.

Рассмотрен ряд возможных предикторов для средней массы трески на основе регрессионных моделей, отражающих зависимость темпа роста от факторов среды. Представлено влияние температуры, плотности популяции и обеспеченности пищей (биомасса мойвы как индикатор) на изменения средней массы СВА трески разных возрастов.

Анализ современных методов прогноза огив половозрелости и мгновенных коэффициентов естественной смертности трески показал, что в настоящее время для целей краткосрочного прогнозирования, применяемого при оценке ОДУ, эти методы оптимальны. В то же время для тестирования Правил регулирования промысла с использованием имитационных моделей более предпочтительными являются зависимости, учитывающие плотность популяции. Несмотря на то, что зависимости дают менее надежный прогноз в краткосрочной перспективе, они важны для учета кардинальной перестройки системы запас-промысел в условиях изменения стратегии эксплуатации запаса СВА трески.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаян, В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): Анализ и рекомендации по применению / В.К. Бабаян. – М.: Изд-во ВНИРО, 2000. – 192 с.

Борисов, В.М. О необходимости учета хищничества баренцевоморской трески *Gadus morhua morhua* в регулировании ее промысла / В.М. Борисов, И.В. Тарантова, Г.А. Крылова // Вопросы рыболовства. – 2018. – Т. 19 (1). – С. 20-33.

Бочков, Ю.А. Ретроспектива температуры воды в слое 0-200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900-1981 гг.) / Ю.А. Бочков // Экология и промысел донных рыб Северо-Европейского бассейна / ПИНРО. – Мурманск: ПИНРО, 1982. – С. 113-122.

Восстановление данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016-2017 гг. / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, В.А. Ившин [и др.] // Труды ВНИРО. – 2018. – Т. 173. – С. 193-206.

Долгов, А.В. Потребление аркто-норвежской треской промысловых рыб и беспозвоночных в 1984-1993 гг. / А.В. Долгов // Проблемы рыбохозяйственной науки в творчестве молодых: сб. докл. конф.-конкурса молодых ученых и специалистов ПИНРО (20-21 апреля 1995 г.) / ПИНРО. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1995. – С. 3-24.

Зависимость роста аркто-норвежской трески *Gadus morhua morhua* от условий откорма мойвой *Mallotus villosus villosus* и температуры воды / В.К. Ожигин, В.Л. Третьяк, Н.А. Ярагина, В.А. Ившин // Вопросы ихтиологии. – 1995. – Т. 35, № 3. – С. 334-342.

Зацепин, В.И. Питание промысловых косяков трески в южной части Баренцева моря / В.И. Зацепин, Н.С. Петрова // Труды Полярного НИИ морского рыбного хозяйства и океанографии. – 1939. – Вып. 5. – 172 с.

Ковалев, Ю.А. Влияние плотности популяции на скорость роста, созревания и продуктивность запаса северо-восточной арктической трески *Gadus morhua morhua* L. / Ю.А. Ковалев, Н.А. Ярагина // Вопросы ихтиологии. – 2009. – Т. 49, № 1. – С. 61-70.

Пономаренко, И.Я. Доля половозрелых особей и соотношение полов в разных возрастных и размерных группах трески в 60-70-е годы / И.Я. Пономаренко // Экология биологических ресурсов Северного бассейна и их промысловое использование: сб. науч. тр. / ПИНРО. – Мурманск, 1984. – С. 70-84.

Распределение трески в Баренцевом море в условиях изменяющегося климата / А.Г. Трофимов, Н.А. Ярагина, В.А. Ившин [и др.]. –

DOI 10.36038/2307-3497-2023-192-68-84 // Труды ВНИРО. – 2023. – Т. 192. – С. 68-84.

Треска Баренцева моря (биолого-промысловый очерк) / В.Д. Бойцов, Н.И. Лебедь, В.П. Пономаренко [и др.]. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1996. – 285 с.

Age determination of Northeast Arctic cod otoliths through 50 years of history / N.V. Zuykova, V.P. Koloskova, H. Mjanger [et al.] // Marine Biology Research. – 2009. – Vol. 5, № 1. – P. 66-74.

Ajiad, A. Sexual difference in maturation of Northwest Arctic cod / A. Ajiad, T. Jakobsen, O. Nakken // Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. – 1999. – Vol. 25. – P. 1-15.

Arctic Fisheries Working Group (AFWG) / C.A. Tranang, A. Aglen, M. Bernreuther [et al.]. – DOI 10.17895/ices.pub.6050 // ICES Scientific Reports. – 2020. – Vol. 2, Iss. 52. – 577 p.

Arctic Fisheries Working Group (AFWG) / J.A. Godiksen, E. Berg, M. Bernreuther [et al.]. – DOI 10.17895/ices.pub.8196 // ICES Scientific Reports. – 2021. – Vol. 3, Iss. 58. – 832 p.

Barents Sea cod (*Gadus morhua*) diet composition: long-term interannual, seasonal, and ontogenetic patterns / R.E. Holt, B. Bogstad, J.M. Durant [et al.]. – DOI 10.1093/icesjms/fsz082 // ICES Journal of Marine Science. – 2019. – Vol. 76, Iss. 6. – P. 1641-1652.

Benchmark Workshop for Barents Sea and Faroese Stocks (WKBARFAR 2021) / A. Aglen, E. Berg, M. Bernreuther [et al.]. – DOI 10.17895/ices.pub.7920 // ICES Scientific Reports. – 2021. – Vol. 3, Iss. 21. – 205 p.

Bertalanffy, L. von. Quantitative laws in metabolism and growth / L. von Bertalanffy. – DOI 10.1086/401873 // The Quarterly Review of Biology. – 1957. – Vol. 32, № 3. – P. 217-231.

Beverton, R.J.H. On the dynamics of exploited fish populations / R.J.H. Beverton, S.J. Holt. – DOI 10.1007/978-94-011-2106-4. – Dordrecht: Springer, 1993. – 538 p.

Bogstad, B. Interactions Between Cod (*Gadus morhua*) and Its Prey Species in the Barents Sea. Forage Fishes in Marine Ecosystems / B. Bogstad, S. Mehl // Proceedings of the International Symposium on the Role of Forage Fishes in Marine Ecosystems. Alaska Sea Grant College Program Report. – 1997. – № 97-01. – P. 591-615.

Björnsson, B. The food-unlimited growth rate of Atlantic cod (*Gadus morhua*) / B. Björnsson, A. Steinarsson // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 2002. – Vol. 59. – P. 494-502.

Boitsov, V.D. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000-2009 / V.D. Boitsov, A.L. Karsakov, A.G. Trofimov. – DOI 10.1093/icesjms/fss075 // ICES Journal of Marine Science. – 2012. – Vol. 69, № 5. – P. 833-840.

Braaten, B. Growth of cod in relation to fish size and ration level / B. Braaten // Propagation of Cod *Gadus morhua* L.: an international symposium (Arendal, 14-17 June 1983). – Bergen: Havforskningsinstituttet, 1984. – Vol. 1. – P. 677-710.

Brander, K. Predicting weight at age. Internal ICES note to assessment working groups / K. Brander // Report of the Study Group on Growth, Maturity and Condition in Stock Projections ICES Headquarters 5-10 December 2002. ICES CM 2003 / D:01 Ref. ACFM, C, G, H, WGMG. – 95 p.

Brander, K.M. Patterns of distribution, spawning, and growth in North Atlantic cod: The utility of inter-regional comparisons / K.M. Brander // ICES Journal of Marine Science. – 1994. – Vol. 198. – P. 406-413.

Brander, K.M. The effect of temperature on growth of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) / K.M. Brander // ICES Journal of Marine Science. – 1995. – Vol. 92. – P. 1-10.

Dementyeva, T.F. Changes in the growth rate of the Barents Sea cod as affected by environmental factors / T.F. Dementyeva, E.M. Mankevich // ICNAF. Special Publication. – 1965. – № 6. – P. 571-577.

Density- and size- dependent mortality in fish early life stages / L.C. Stige, L.A. Rogers, A.B. Neuheimer [et al.]. – DOI 10.1111/faf.12391 // Fish and Fisheries. – 2019. – Vol. 20. – P. 962-976.

Diets of the Barents Sea cod (*Gadus morhua*) from the 1930s to 2018 / B.L. Townhill, R.E. Holt, B. Bogstad [et al.]. – DOI 10.5194/essd-13-1361-2021 // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 1361-1370.

Elliott, J.M. The growth rate of brown trout, *Salmo trutta* L., fed on maximum rations / J.M. Elliott // Journal of Animal Ecology. – 1975. – Vol. 44. – P. 805-821.

Gjørseter, H. The population biology and exploitation of capelin (*Mallotus villosus*) in the Barents Sea / H. Gjørseter // Sarsia. – 1998. – Vol. 83. – P. 453-496.

Gjørseter, H. The Barents Sea capelin stock 1972-1997. A synthesis of results from acoustic surveys / H. Gjørseter, A. Dommasnes, B. Røttingen // Sarsia. – 1998. – Vol. 83. – P. 497-510.

Global imprint of climate change on marine life / E.S. Poloczanska, C.J. Brown, W.J. Sydeman [et al.]. – DOI 10.1038/nclimate1958 // Nature Climate Change. – 2013. – Vol. 3. – P. 919-925.

Gulland, J.A. The abundance of fish stocks in the Barents Sea / J.A. Gulland // Rapports et procès-verbaux des reunions. Conseil International pour L'Exploration de La Mer. – 1964. – Vol. 155. – P. 126-137.

Jakobsen, T. Management of Northeast Arctic cod: Past, Present – and Future? / T. Jakobsen // Proceeding of the International Symposium on management Strategies for Exploited Fish Populations – (Alaska Sea Grant College Program; AK-SG-93-02). – Fairbanks: University of Alaska, 1993. – P. 321-338.

Jobling, M. A review of the physiological and nutritional energetics of cod, *Gadus morhua* L., with particular reference to growth under farmed conditions / M. Jobling // Aquaculture. – 1988. – № 70. – P. 1-19.

Jørgensen, T. Long-term changes in age at sexual maturity of Northeast Arctic cod (*Gadus morhua* L.) / T. Jørgensen // Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer. – 1990. – Vol. 46. – P. 235-248.

Kovalev, Yu.A. Cod (*Gadus morhua*) in subareas 1 and 2 (Northeast Arctic). Stock specific documentation of standard assessment procedures used by ICES. On Arctic Fisheries Working Group (AFWG). WKBarFar – 2021: stock Annex. Stock ID: cod.27.1-2 / Yu.A. Kovalev, B. Bogstad, N.A. Yaragina. – Copenhagen: ICES, 2021. – 17 p.

Little, A.G. What do warming waters mean for fish physiology and fisheries? / A.G. Little, I. Loughland, F. Seebacher. – DOI 10.1111/jfb.14803 // Journal of Fish Biology. – 2021. – № 98. – P. 1493.

Lorenzen, K. Density- dependence in the life history of fishes: When is a fish recruited? / K. Lorenzen, E.V. Camp. – DOI 10.1016/j.fishres.2018.09.024 // Fisheries Research. – 2018. – № 217. – P. 5-10.

Mehl, S. Methods and results in the joint PINRO-IMR stomach sampling program / S. Mehl, N.A. Yaragina // In: B. Bogstad, and S. Tjelmeland (eds.), Interrelations between fish populations in the Barents Sea. Proceedings of the fifth PINRO-IMR Symposium. Murmansk, 12-16 August 1991. – Institute of Marine Research, Bergen, Norway. – 1992. – P. 5-16.

Nakken, O. Causes of trends and fluctuations in the Arcto-Norwegian cod stock / O. Nakken // ICES Journal of Marine Science. – 1994. – Vol. 198. – P. 212-228.

Nielsen, A. Estimation of time-varying selectivity in stock assessments using state-space models / A. Nielsen, C.W. Berg. – DOI

10.1016/j.fishres.2014.01.014 // Fisheries Research. – 2014. – Vol. 158. – P. 96-101.

Piscivorous fish / A.V. Dolgov, E.L. Orlova, E. Johannesen, B. Bogstad // The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation / IMR, PINRO; ed.: T. Jakobsen, V.K. Ozhigin. – Trondheim, 2011. – Chapter 8.4. – P. 466-484.

Ponomarenko, I.Ya. Maturity rate of the Lofoten-Barents Sea cod in 1940s and 1990s / I.Ya. Ponomarenko, N.A. Yaragina // ICES Document CM 1994/G:30. – 17 p.

Precautionary approach to fisheries. Part 1: Guidelines on the precautionary approach to capture fisheries and species introductions // FAO Fisheries Technical Paper. – Rome: FAO, 1995. – № 350. – 52 p.

Projecting shifts in thermal habitat for 686 species on the North American continental shelf / J.W. Morley, R.L. Selden, R.J. Latour [et al.]. – DOI 10.1371/journal.pone.0196127 // PLoS One. – 2018. – Vol. 13, Iss. 5. – Art. e0196127.

Recruitment variability and growth of Northeast Arctic cod: influence of physical environment, demography, and predator-prey energetics / E.M. Nilssen, T. Pedersen, C.C.E. Hopkins [et al.] // ICES Journal of Marine Science. – 1994. – Vol. 198. – P. 449-470.

Report of the Arctic Fisheries Working Group (Copenhagen, Denmark, 23 August-1 September 1999) // ICES Document CM 2000/ACFM:3. – Copenhagen, 2000. – 310 p.

Report of the Arctic Fisheries Working Group (Bergen, Norway, 24 April-3 May 2001) // ICES Document CM 2001/ACFM:19. – Copenhagen, 2001. – № 2/2001. – 380 p.

Report of the second Workshop on Management Plan Evaluation on Northeast Arctic cod and haddock and Barents Sea capelin (WKNEAMP-2), 25-28 January 2016, Kirkenes, Norway // ICES Document CM 2016/ACOM:47. – 76 p.

Report of the Joint Russian-Norwegian Working Group on Arctic Fisheries (JRN-AFWG) 2023 – JRN-AFWG Report 2023 // IMR-PINRO Report series. – 2023. – № 2023-7. – 189 p.

Ricker, W.E. Stock and recruitment / W.E. Ricker. – DOI 10.1139/f54-039 // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 1954. – Vol. 11. – P. 559-623.

The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation / IMR, PINRO; ed. T. Jakobsen, V.K. Ozhigin. – Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. – 825 p.

When in life does density dependence occur in fish populations? / K.H. Andersen, N.S. Jacobsen, T. Jansen, J.E. Beyer. – DOI 10.1111/faf.12195 // Fish and Fisheries. – 2017. – Vol. 18. – P. 656-667.

Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) / E. Bagøien, B. Bogstad, D. Dalpadado [et al.]. – DOI 10.17895/ices.pub.5998 // ICES Scientific Reports. – 2020. – Vol. 2, Iss. 30. – 206 p.

Yaragina, N.A. 2009. Variability in cannibalism in Northeast Arctic cod (*Gadus morhua* L.) during the period 1947-2006 / N.A. Yaragina, B. Bogstad, Yu.A. Kovalev // Marine Biology Research. – 2009. – Vol. 5. – P. 75-85.

Yaragina, N. Extrapolating predation mortalities back in time: an example from Northeast Arctic cod cannibalism // N. Yaragina, Y. Kovalev, A. Chetyrkin. – DOI 10.1080/17451000.2017.1396342 // Marine Biology Research. – 2018. – Vol. 14, № 2. – P. 203-216.

Zimmermann, F. Density regulation in Northeast Arctic fish populations: Density dependence is stronger in recruitment than in somatic growth / F. Zimmermann, D. Ricard, M. Heino. – DOI 10.1111/1365-2656.12800 // Journal of Animal Ecology. – 2018. – Vol. 87. – P. 672-681.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Материал и методика	9
Прогноз массы рыб в запасе.....	11
Прогноз массы рыб в улове.....	25
Прогноз доли половозрелых рыб по возрастам	25
Прогноз коэффициентов естественной смертности по причине каннибализма	27
Заключение	29
Список использованной литературы.....	30

**Ковалев Юрий Александрович,
Ярагина Наталья Анатольевна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ
ПРИ ОЦЕНКЕ ОБЩЕГО ДОПУСТИМОГО УЛОВА**

Редактор Е.Е. Олонцева
Техническое редактирование Е.Е. Олонцевой
Обложка О.С. Морозовой

Подписано в печать 02.10.2024 г.

Уч.-изд. л. 2,6.

Усл. печ. л. 2,2

Заказ 10.

Формат 60x84/16.

Тираж 25 экз.

183038, Мурманск, ул. Академика Книповича, 6, Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО».