

ПРОМЫСЕЛ ГИДРОБИОНТОВ

УДК 639.2.053.7:639.223

**УТОЧНЕНИЕ КОГОРТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
ЗАПАСА ТРЕСКИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

© 2020 г. Д. А. Васильев¹, Ю. А. Ковалев², А. А. Четыркин²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Москва, 107140*

² *Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), Мурманск, 183038
e-mail: dvasilyev@vniro.ru*

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

Модель SAM используется для оценки состояния запасов баренцевоморской (северо-восточной арктической) трески с 2017 г. Конфигурация модели утверждена на семинаре ИКЕС по экспертизе метода оценки запаса трески. Данная конфигурация модели предполагает, что при описании корреляционной структуры данных ошибки наблюдений не различаются между возрастными группами внутри одной съемки и в данных об уловах. Как показал анализ, для баренцевоморской трески эти допущения не являются адекватными, и для более корректной оценки требуется более подробная детализация дисперсий. Это связано с тем, что возрастная структура запаса в последние годы существенно изменилась в сторону увеличения доли рыб старшего возраста. Описанный в работе уточненный вариант модели SAM показал заметное улучшение показателей диагностики и позволил получить более точную оценку текущего состояния запаса трески.

Ключевые слова: оценка запасов, северо-восточная арктическая треска, модель SAM, информационный критерий Акаике, стандартные отклонения остатков.

ВВЕДЕНИЕ

Модель SAM в последние годы получила широкое распространение в мировой практике, а том числе в ИКЕС. Начиная с 2017 г., эта модель используется в качестве основной модели для оценки состояния запасов баренцевоморской (северо-восточной арктической) трески.

Модель SAM относится к так называемым моделям пространства состояний (state space models) (Nielsen, and Berg, 2014). Модели этого класса представляют собой общую идеологическую платформу, предназначенную для анализа динамических систем, в рамках которой интересующие нас величины («состояния»), не поддающиеся непосредственному наблюдению, оцениваются по непрямым измерениям («наблюдениям»), содержащим шум. Наблюдения

связаны с состояниями посредством уравнений наблюдений. Состояния связаны между собой во времени посредством «уравнений состояния» (или «уравнений системы») и также подвержены случайным возмущениям, называемым «шумом процесса». Важным свойством моделей пространства состояний является количественное описание случайной изменчивости как наблюдений, так и уравнений системы. Это выражается через дисперсии наблюдений и дисперсии процесса, которые оцениваются с помощью подходов максимального правдоподобия и дают соответствующие весовые коэффициенты каждому виду входных данных при оценивании общей целевой функции. Вектор ненаблюдаемых состояний представляет собой логарифмы численности по возрастным группам, а также логарифмы промысловой

смертности. Ошибки процесса для логарифмов численности принимаются независимыми и нормально распределенными. Вектор промысловой смертности в модели следует процессу коррелированного случайного блуждания (random walk).

Отметим, что в моделях, применяемых для оценки состояния запасов и основанных на данных с размерной или возрастной структурой, часто используется допущение о том, что наблюдения являются статистически независимыми друг от друга. В действительности же, как правило, наблюдения не являются «первичными» — чаще они являются результатом различного рода статистической обработки первичных данных, включая, например, стандартизацию. Нарушения предположения о взаимной независимости данных могут существенно повлиять на результаты анализа и их доверительные интервалы. В этой связи важным свойством модели SAM является возможность учета корреляции между возрастными группами в те или иные годы в моделях наблюдений как для уловов, так и для съёмок (Berg, Nielsen, 2016).

Для оценки состояния запасов северо-восточной арктической трески в рамках рабочей группы по арктическому рыболовству ИКЕС используются три модели с возрастной структурой. В качестве основной модели принята модель SAM. В качестве вспомогательной модели применяется модель TISVPA (Васильев, 2006; Vasilyev, 2005),

в которой повышенное внимание уделяется робастности результатов, а также модель XSA (Shepherd, 1999), использовавшаяся ранее на протяжении более двух десятков лет для оценки состояния запаса баренцевоморской трески.

Поскольку основной моделью для оценки состояния запасов северо-восточной арктической трески с 2017 г. стала модель SAM, применяющаяся в ИКЕС в настоящее время для оценки состояния большинства запасов, оптимизация опций именно этой модели применительно к запасу баренцевоморской трески является важнейшей задачей, напрямую связанной с интересами отечественного рыболовства.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исходными данными для оценки состояния запаса баренцевоморской трески являются: общий вылов трески и возрастной состав уловов, данные по каннибализму трески, средний вес по возрастам в улове и запасах, доля половозрелых рыб, а также индексы численности по возрастным группам и годам, полученные в научных съёмках (табл. 1). Данные по каннибализму используются в модели для уточнения оценок мгновенных коэффициентов естественной смертности. Процедура «внутримодельного» уточнения оценок мгновенных коэффициентов естественной смертности в версии модели SAM, использующейся для оценки состояния запаса

Таблица 1. Характеристика данных для настройки модели динамики численности баренцевоморской трески

Условное обозначение индекса численности	Название	Диапазон возрастов
Флот 15	Февральская съёмка в Баренцевом море	4–12
Флот 16	Февральская акустическая съёмка + норвежская Лофотенская акустическая съёмка	4–12
Флот 18	Российская тралово-акустическая и траловая съёмка донных рыб, ноябрь–декабрь	3–12
Флот 007	Экосистемная съёмка, август–сентябрь	3–12

са трески на рабочей группе ИКЕС по арктическому рыболовству, достаточно сложна, и ее обсуждение вышло бы далеко за рамки темы настоящей статьи (подробности в материалах и ссылках рабочей группы (ICES, 2019)).

Для настройки модели SAM доступны следующие параметры:

- параметр, характеризующий связь между численностью в смежных возрастных группах по данным съемок. Для исследуемого запаса был выбран вариант, соответствующий авторегрессии первого порядка для всех съемок;

- параметры, определяющие форму связи между коэффициентами улавливаемости по возрастным группам и их численностью;

- параметр, определяющий межгодовую изменчивость промысловой смертности (F) для всех возрастов. В рамках модели SAM значения F в текущем году опреде-

ляются через значения F предыдущего года плюс отклонение, диапазон которого рассчитывается независимо для каждой группы возрастов, выделенных при настройке данного параметра.

Как показал анализ, для баренцево-морской трески вариации этих параметров не оказывают решающего влияния на качество настройки и результат оценки параметров модели.

Отдельное внимание было уделено параметру, описывающему корреляционную структуру данных наблюдений (съемок). В индексах съемок возможно наличие автокорреляции в данных о численности возрастных групп. Для того, чтобы исключить влияние этого фактора, необходимо ввести поправочные коэффициенты при расчете промысловой смертности, которая используется при моделировании индексов в модели SAM. Индексы были проверены на наличие автокорреляции (рис. 1). Для всех съемок

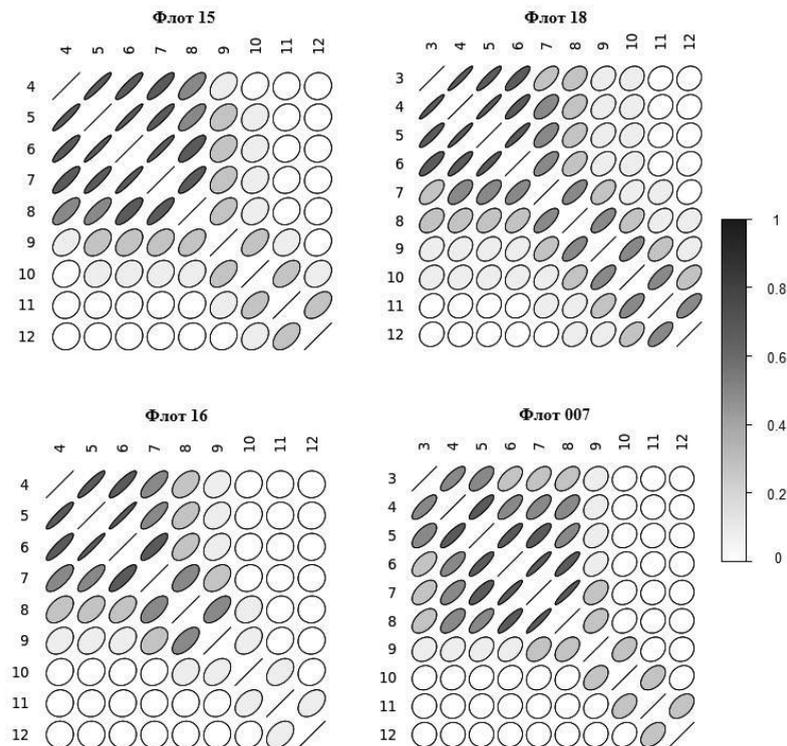


Рис. 1. Корреляционные связи между численностью возрастных групп. Более темным цветом отмечена более высокая степень связи.

наиболее адекватной моделью оказалась авторегрессия первого порядка.

Объединение старших возрастов в группы приводит к тому, что матрица ковариаций для этих групп будет включать в себя общее значение стандартного отклонения для всех возрастов внутри этой группы.

Более результативным оказался анализ степени детализации дисперсий для данных по возрастному составу уловов и съемок, значения которых оцениваются в рамках модели и используются при оценке других параметров. В связи с тем, что методики проведения съемок и используемый инструментарий значительно отличаются между собой, статистические свойства данных в различных съемках могут существенно отличаться. Модель предполагает, что межгодовая изменчивость численности по возрастам, полученная по данным съемок и уловов, обуславливается не только изменением численности всей популяции, но также ошибками самой съемки. Эта ошибка, естественно, может различаться между возрастными группами внутри одной съемки. В связи с этим в модели вводится параметр дисперсии, который определяет диапазон возможной ошибки. На рабочей группе ИКЕС по арктическому рыболовству в 2018 г. он был установлен единым для всех возрастов внутри одной съемки, но оценивался отдельно для каждой из съемок и для уловов.

Как показали наши исследования (Vasilyev et al., 2019), по всей видимости, требуется более подробная детализация дисперсий. Дело в том, что если для некоторых возрастных групп данным присуща существенная более высокая дисперсия, то использование одной и той же дисперсии для всех возрастных групп (даже в рамках одной и той же съемки) может привести к тому, что модель окажется неспособной достаточно хорошо настроиться на эти данные, так как в процедуре случайного поиска (random walk) при оценке параметров может не хватить «разброса» ошибок. В то же время, если в общий диапазон данных включать возрастные группы с явно более низким разбросом ошибок, то оцениваемая дисперсия, используемая и для всех других возрастных

групп, может оказаться заниженной. В свою очередь, использование более высоких значений дисперсии для возрастов с более точными данными может приводить к более «грубой» оценке, что возможно исходя из данных наблюдений.

Одним из важных критериев «качества» описания данных моделью считается близость к единице стандартных отклонений нормированных остатков (Francis, 2011). Поскольку остатки в модели SAM являются нормированными логарифмическими, коррекция степени детализации дисперсий проводилась нами на основе анализа стандартных отклонений остатков модели по возрастным группам для данных по возрастному составу уловов и четырех видов съемок.

В качестве меры качества настройки модели с учетом возросшего количества оцениваемых параметров использовался информационный критерий Акаике (AIC).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стандартные отклонения остатков для каждого из вида данных при настройке модели SAM в ее «стандартном» (принятом ИКЕС в 2017 г.) варианте, представлены в таблице 2. Обозначим этот вариант модели SAM0.

Как можно видеть из таблицы, для данных по возрастному составу уловов стандартные отклонения остатков для старших возрастных групп существенно больше, чем для остальных возрастных групп, поэтому для этих групп в расчетах нами было предложено использовать оценку дисперсии, отличную от таковой для других возрастных групп. Для флота 15 значения дисперсии, отличающиеся от таковых для остальных возрастных групп, нами было предложено использовать для возрастных групп 4 и 11; для флота 16 — для возрастной группы 11; для флота 18 — специфическую, но одну и ту же дисперсию нами было предложено использовать для возрастных групп 9, 11 и 12; для флота 007 отличную от других дисперсию наблюдений — для возрастной группы 12 (Vasilyev et al., 2019).

Таблица 2. Стандартные отклонения остатков по возрастным группам в модели SAM0

Возраст\ данные	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Уловы	1,00	0,71	0,68	0,62	0,64	0,55	0,52	0,85	0,79	1,18	1,34	1,69	2,26
Флот 15		0,38	1,08	0,95	0,91	1,06	0,99	0,90	1,44	1,14			
Флот 16		0,83	0,81	0,90	0,86	0,92	0,97	0,75	1,27	1,03			
Флот 18	0,54	0,98	1,00	0,86	0,66	0,70	1,39	0,97	1,35	1,27			
Флот 007	0,92	0,79	0,94	0,96	1,04	1,06	0,56	0,64	1,02	1,61			

На рабочей группе ИКЕС по арктическому рыболовству (ICES, 2019) в итоге был применен вариант установки параметров, отличающийся от варианта, предложенного нами (Vasilyev et al., 2019) лишь тем, что для возрастного состава уловов отдельное (и одно и то же) значение дисперсии использовалось не для двух, а для трех старших возрастных групп. Обозначим этот вариант модели как SAM1.

Естественно, возможны более детальные установки различающихся дисперсий, однако это привело бы к существенному увеличению количества параметров модели, что может привести к перепараметризации модели.

Стандартные отклонения остатков для каждого из вида данных при новом варианте настройки модели SAM (SAM1) представлены в таблице 3.

Как показывает сравнение таблиц 2 и 3, внесенные нами уточнения привели к заметному приближению к единице значений стандартных отклонений остатков для большинства из возрастных групп.

Кроме того, по сравнению с ранее использовавшимся вариантом установки параметров модели SAM качество подгонки уточненной модели (с учетом коррекцией на увеличение числа параметров) также улучшилось. В таблице 4 представлены значения

Таблица 3. Стандартные отклонения остатков по возрастным группам в модели SAM1

Возраст\ данные	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Уловы	1,02	0,83	0,79	0,72	0,87	0,76	0,72	1,01	1,04	1,51	0,95	1,10	1,46
Флот 15		0,64	0,84	0,99	0,89	1,06	1,14	1,05	0,95	1,25			
Флот 16		0,89	0,95	0,80	0,89	0,97	1,06	0,86	1,06	1,04			
Флот 18	0,76	1,16	1,02	0,82	0,80	0,84	1,01	0,49	1,05	1,11			
Флот 007	1,02	0,83	0,95	1,00	1,04	0,99	0,66	0,76	1,29	1,04			

Таблица 4. Количество оцениваемых параметров и значения информационного критерия Акаике (AIC) для различных вариантов модели

Вариант модели SAM	Количество параметров	AIC
SAM0	64	2845
SAM1	70	2509

Таблица 5. Ретроспективная смещенность оценок биомассы нерестового запаса (SSB), численности пополнения (R) и средней промысловой смертности в возрастных группах от 5 до 10 лет (F_{5-10}), полученных по модели SAM для трески Баренцева моря

Вариант модели SAM	ρ (SSB)	ρ (R_3)	ρ (F_{5-10})
SAM0	8%	-27%	-3%
SAM1	8%	-20%	-1%

общего количества оцениваемых параметров и информационного критерия Акаике (AIC) для компоновки модели, использовавшейся ранее (SAM0), и для уточненной версии модели (SAM1). Отметим, что, хотя уточненная версия модели включает в себя несколько большее количество параметров, информационный критерий Акаике учитывает это изменение и позволяет сравнивать качество описания данных моделью для вариантов одной и той же модели с различным числом параметров.

Внесенные уточнения в конфигурацию модели привели также к улучшению в целом результатов ретроспективной диагностики: если мера исторической смещенности оценок биомассы нерестового запаса ρ (SSB) не изменилась, то для оценок по-

полнения в возрасте 3 года (R_3) и средней промысловой смертности для возрастных групп 5–10 (F_{5-10}) смещенность оценок заметно снизилась (табл. 5). Используемый ρ -критерий (Mohn, 1999) является распространенным критерием для количественной оценки ретроспективной смещенности. Он представляет собой сумму относительных отклонений между оценками, полученными по сокращенным рядам данных, и оценками, полученными по полным рядам.

На рисунке 2 представлены оценки биомассы нерестового запаса трески, полученные на заседании рабочей группы ИКЕС по арктическому рыболовству, состоявшемся в апреле 2019 года (ICES, 2019) по двум вариантам модели SAM, а также по моделям XSA и TISVPA.

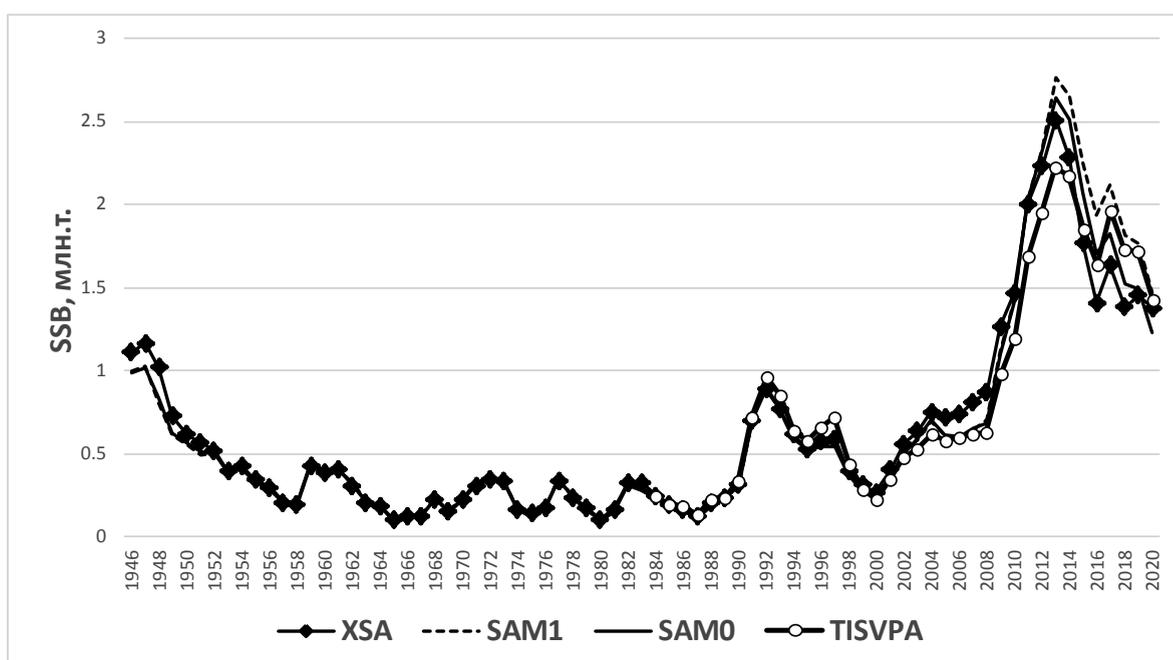


Рис. 2. Оценки биомассы нерестового запаса баренцевоморской трески (SSB), полученные по различным моделям, применяемым на Рабочей группе ИКЕС по арктическому рыболовству.

По уточненной версии модели SAM нерестовый запас для последних лет оценен несколько выше, чем по старой версии, причем для 2019 г. оценки оказались весьма близки к оценкам, полученным по моделям TISVPA и XSA.

Оценка ОДУ трески на 2020 г., полученная по уточненной модели SAM, расчет по которой был принят рабочей группой в качестве основного, составила 766,7 тыс. т., при этом оценка ОДУ на 2020 г. по «старой» версии модели SAM составила всего 689,7 тыс. т. (ICES, 2019).

ОБСУЖДЕНИЕ

В последние годы основу промысла составляли многочисленные поколения 2004 и 2005 годов рождения. Рациональный режим промысла в сочетании с благоприятными условиями выживания привел к 2013–2014 годам к исключительному увеличению биомассы запаса. Далее последовало некоторое снижение биомассы, однако запас по-прежнему находится в весьма благополучном состоянии. Однако доминирование поколений 2004–2005 годов рождения и относительно низкий уровень промысловой смертности в последние годы привели к тому, что в настоящее время более 30% биомассы нерестового запаса составляют особи в возрасте 12 лет и старше. Это создает существенные трудности для применения модельного анализа, поскольку подобная возрастная структура запаса в последние 30 лет не наблюдалась, а для старших возрастных групп данные съемок весьма ограничены. По этим причинам вариант модели SAM, утвержденный в ИКЕС в 2017 г., очень быстро перестал быть оптимальным и нуждался в уточнении.

Описанный в работе уточненный вариант модели привел к заметному улучшению показателей диагностики и был одобрен рабочей группой ИКЕС по арктическому рыболовству (ICES, 2019). Од-

нако останется ли он актуальным и в дальнейшем при смещении пика биомассы к еще более старшим возрастным группам, подлежит рассмотрению в рамках последующих встреч российских и норвежских ученых, а также в рамках заседаний рабочих групп ИКЕС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильев Д. А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006611764 // Реестр программ для ЭВМ. 2006.

Berg C. W., Nielsen A. Accounting for correlated observations in an age-based state-space stock assessment model // ICES J. Mar. Sci. (2016), 73 (7), 1788–1797.

Francis R. I. C. C. Data weighting in statistical fisheries stock assessment models // Can. J. Fish. Aquat. Sci. (2011). V. 68. P. 1124–1138.

ICES. Report of the Arctic Fisheries Working Group (AFWG) // ICES Scientific Reports. 2019. 930 p. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.5292>

Mohn R. The retrospective problem in sequential population analysis: An investigation using cod fishery and simulated data // ICES J. Mar. Sci. 1999. V. 56. P. 473–488.

Nielsen A., Berg C. W. Estimation of time-varying selectivity in stock assessments using state-space models // Fisheries Research (2014) V. 158. P. 96–101.

Shepherd J. G. Extended survival analysis — an improved method for the analysis of catch-at age data and abundance indices // ICES J. Mar. Sci. (1999) V. 56. P. 584–591.

Vasilyev D. Key aspects of robust fish stock assessment. M.: VNIRO Publ., 2005. 105 p.

Vasilyev D., Kovalev Yu., Chetyrkin A. The effect of age-specific setting of variance parameters for the observations in North-East Arctic cod stock assessment by means of SAM // AFWG 2019 WD2. 4 p.

**THE CLARIFIED COHORT MODEL FOR THE BARENTS SEA COD
STOCK ASSESSMENT**

© 2020 г. D.A. Vasilyev¹, Yu.A. Kovalev², A.A. Chetyrkin²

¹ *Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, 107140*

² *Polar Department of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (PINRO),
Murmansk, 183038*

The SAM model is used for North-East Arctic cod stock assessment since 2017. The configuration for the model was agreed at the ICES special benchmark group. This configuration assumes the same properties of errors for all age groups within the same kind of surveys and in catch-at-age data. The results of the analysis show that for North-East arctic cod this assumption is not valid and for correct stock assessment a more detailed specification of variances is required. This is caused by significant change in age structure of the cod stock in recent years towards higher portion of elder age groups. The clarified model options described here had resulted in significant improvement of assessment diagnostics and more precise results of North-East Arctic cod stock assessment.

Keywords: stock assessment, North-East Arctic cod, SAM model, Akaike's information criterion, standard deviations of residuals.