

# Альтернативная оценка запаса баренцевоморской трески с использованием модели *TISVPA*

Д.А. Васильев, Т.И. Булгакова – ВНИРО

## Введение

Оценка запаса трески в рамках Международного совета по исследованию моря (ИКЕС) традиционно проводится с помощью модели XSA [Shepherd J.G. *Extended Survivors' Analysis: an improved method for analysis of catch-at-age data*// ICES Working Group on Methods. June 1991. Working paper. 1991. 16 pp.]. С момента своего появления в арсенале методов оценки запасов сырьевых рабочих групп ИКЕС модель XSA стала весьма популярной, в связи с тем что позволяла привлекать к оценке запаса, проводимой на основе данных по возрастному составу уловов, сразу несколько индексов численности запаса с возрастной структурой и провести достаточно подробную диагностику решения.

С другой стороны, опыт использования этой модели показал и ее существенные слабые стороны. Во-первых, неизвестен точный статистический смысл решения, поскольку оно получается не путем прямой максимизации выбранной целевой функции, а в результате схождения специальной итеративной процедуры. Эта процедура может и вовсе не сходиться, однако даже в случае ее схождения к некоторому решению данное решение может оказаться весьма далеким от действительного максимума выбранной целевой функции. Дополнительную статистическую неоднозначность в решение привносит использование процедуры «стягивания к среднему» (*shrinkage*).

Во-вторых, решение целиком основывается на трендах, присутствующих в так называемой дополнительной информации (съемки; промысловые уловы на усилие и др.), в то время как сигнал о состоянии запаса из наиболее представительных из имеющихся данных – данных о возрастном составе уловов – напрямую не используется (в основе метода – простая несепарабельная когортная модель).

В-третьих, в модели совершенно не используются принципы и приемы робастной статистики, что совершенно необходимо при работе с реальными, т.е. «зашумленными» данными.

Отметим также и другие недостатки модели XSA, снижающие ее практическую ценность, например, невозможность напрямую привлечь к расчетам имеющиеся «интегральные» оценки запаса (например, оценки биомассы общего или нерестового запасов); кроме того, в рамках модели XSA невозможно устранить влияние на результат случайных межгодовых различий в условиях проведения съемок (например, с помощью настройки на возрастные пропорции вместо настройки на оценки или индексы абсолютной численности возрастных групп, как это делается во многих современных моделях).

Понимание этого привело к тому, что в последнее десятилетие модель XSA реже используется как в мировой практике, так и в практике рабочих групп ИКЕС для получения серьезных оценок состояния запасов, а все большее место занимают более совершенные (чаще – сепарабельные) модели, которые могут более статистически осмысленно использовать всю имеющуюся информацию о запасах, в том числе информацию, непосредственно имеющуюся в данных по возрастному составу уловов. Это такие широко используемые в рамках ИКЕС модели, как *ICA*, *AMCI*, *SMS*, и др. К подобным моделям относится и модель *ISVPA*, включая ее расширенную версию *TISVPA*. Отличительной чертой модели *ISVPA* (*TISVPA*) является целенаправленное использование принципов робастной статистики с целью снижения искажающего влияния

ошибок в данных на результаты анализа [Vasilyev D. *Winsorization: does it help in cohort models?* ICES CM 2004/K:45; Vasilyev D. *Key aspects of robust fish stock assessment*. M.: VNIRO Publishing, 2005. 105 pp.; Vasilyev D. *Change in catchability caused by year class peculiarities: how stock assessment based on separable cohort models is able to take it into account? (Some illustrations for triple-separable case of the ISVPA model – TISVPA)*. ICES CM 2006/O:18. 35 pp.; Kizner Z.I. and Vasilyev D.A. *Instantaneous Separable VPA (ISVPA)*. ICES Journal of Marine Science, 1997. 54, No. 3. P. 399–411].

## Модель и данные

В большинстве современных моделей, используемых для оценки состояния запасов, в той или иной степени используется так называемое сепарабельное представление коэффициентов промысловой смертности – в виде произведения факторов, зависящих от возраста, и факторов, зависящих от года. Такая параметризация модели позволяет снизить количество неизвестных и получать однозначную информацию о текущем состоянии запаса непосредственно из данных по возрастному составу уловов. Однако иногда считается, что сепарабельные модели являются излишне структурно жесткими для описания особенностей взаимодействия различных поколений с промыслом.

Эта проблема решается использованной здесь версией модели *ISVPA*, названной *TISVPA* (*Triple Instantaneous Separable VPA*). Вкратце, этот вариант модели представляет коэффициенты промысловой смертности (точнее – коэффициенты эксплуатации) в виде произведения трех параметров:  $f(\text{year}) \times s(\text{age}) \times g(\text{cohort})$ , т.е. дает возможность оценить в рамках когортной модели дополнительный набор параметров, связанных с поколением. Этот дополнительный набор параметров позволяет адаптировать традиционное сепарабельное представление промысловой смертности (как произведение зависящего от года компонента и компонента, зависящего от возрастной группы) к ситуациям, когда некоторые поколения могут иметь особенности в своем взаимодействии с промысловыми флотами, вызванные, например, их различным пространственным распределением, большей притягательностью для промысла более многочисленных поколений или другими причинами. Кроме того, подобный прием позволяет в определенной степени снизить влияние некоторых систематических ошибок в данных.

Упомянутые выше зависящие от поколения множители ( $g$ -факторы) могут быть оценены и применены не только для всего интервала возрастных групп, включенных в модель, но и для некоторого выбранного возрастного «окна». Это помогает, во-первых, быть ближе к реальной ситуации (если известно, что только некоторый диапазон возрастных групп может иметь зависящие от численности поколения особенности во взаимодействии с промыслом) и, во-вторых, снизить влияние возрастных групп, данные по возрастному составу уловов для которых имеют более низкое качество (обычно – самые младшие или старшие возрастные группы). Для возрастных групп, не входящих в выбранный диапазон, значения  $g$ -факторов принимаются равными единице, но в результате общей нормализации всех  $g$ -факторов на единицу в среднем, используемой в модели для балансировки процедуры оценки параметров, могут в результате принимать несколько отличные от единицы значения.

Относительно связанных с поколением особенностей в общей возрастной зависимости селективных свойств промысла в модели предусмотрены два варианта:

- 1) подмодель «внутригодového перераспределения промыслового усилия между возрастными группами»;
- 2) подмодель «общего роста (снижения) селективности для отдельных возрастов».

В рамках первой подмодели предполагается, что в каждом году поколения, более «притягательные» для промысла, «заимствуют» некоторое количество промыслового усилия у других поколений за счет увеличения их коэффициента селективности и снижения коэффициентов селективности других когортов в данном году. Вторая подмодель предполагает, что некоторые поколения имеют более высокие (или низкие) коэффициенты селективности, но это не приводит к непосредственным изменениям коэффициентов селективности для других поколений. В наших расчетах использовался вариант 1 – подмодель «внутригодového перераспределения промыслового усилия между возрастными группами».

Важной характеристикой моделей группы *ISVPA* (*TISVPA*) является целенаправленное использование принципов робастной статистики в процедурах оценивания параметров модели. Именно это помогает снизить влияние ошибок в данных на результаты анализа и выделять больше информации о системе запас – промысел из имеющихся данных. Модели группы *TISVPA* включают в себя различные приемы, помогающие работать с данными ре-

ального (т.е. достаточно низкого) качества. Среди них: робастные целевые функции; возможность целенаправленного обеспечения несмещенности решения; независимость оценок возрастной зависимости относительной селективности промысла от выбора пользователем ее формы; применение различных опций относительно взаимной справедливости предположений о качестве данных по возрастному составу уловов и устойчивости селективных свойств промысла; возможность исключения влияния межгодовых изменений в коэффициентах улавливаемости съёмки на результаты анализа и др. Краткое описание модели представлено в *таблице*.

В проведенной нами оценке состояния запаса трески использовались те же данные, что и в расчетах, проведенных Рабочей группой по арктическому рыболовству ИКЕС с использованием модели *XSA* [*ICES AFWG Report. 2007. P. 128–265*]: данные по возрастному составу уловов; средней массе особей по возрастным группам и годам; долям половозрелых рыб по годам. Величина мгновенного коэффициента естественной смертности принята равной 0,2 для всех возрастных групп (каннибализм учитывался путем включения количественных его оценок в матрицу уловов). Данные по возрастному составу уловов включали в себя *российские* оценки неучтенного вылова. Как и в расчетах по модели *XSA*, использовались четыре индекса численности запаса с возрастной структурой: уловы на усилие (*срue*) российского тралового флота (флот 1); совместные донные траловые съёмки (флот 2); совместные акустические съёмки в Баренцевом море

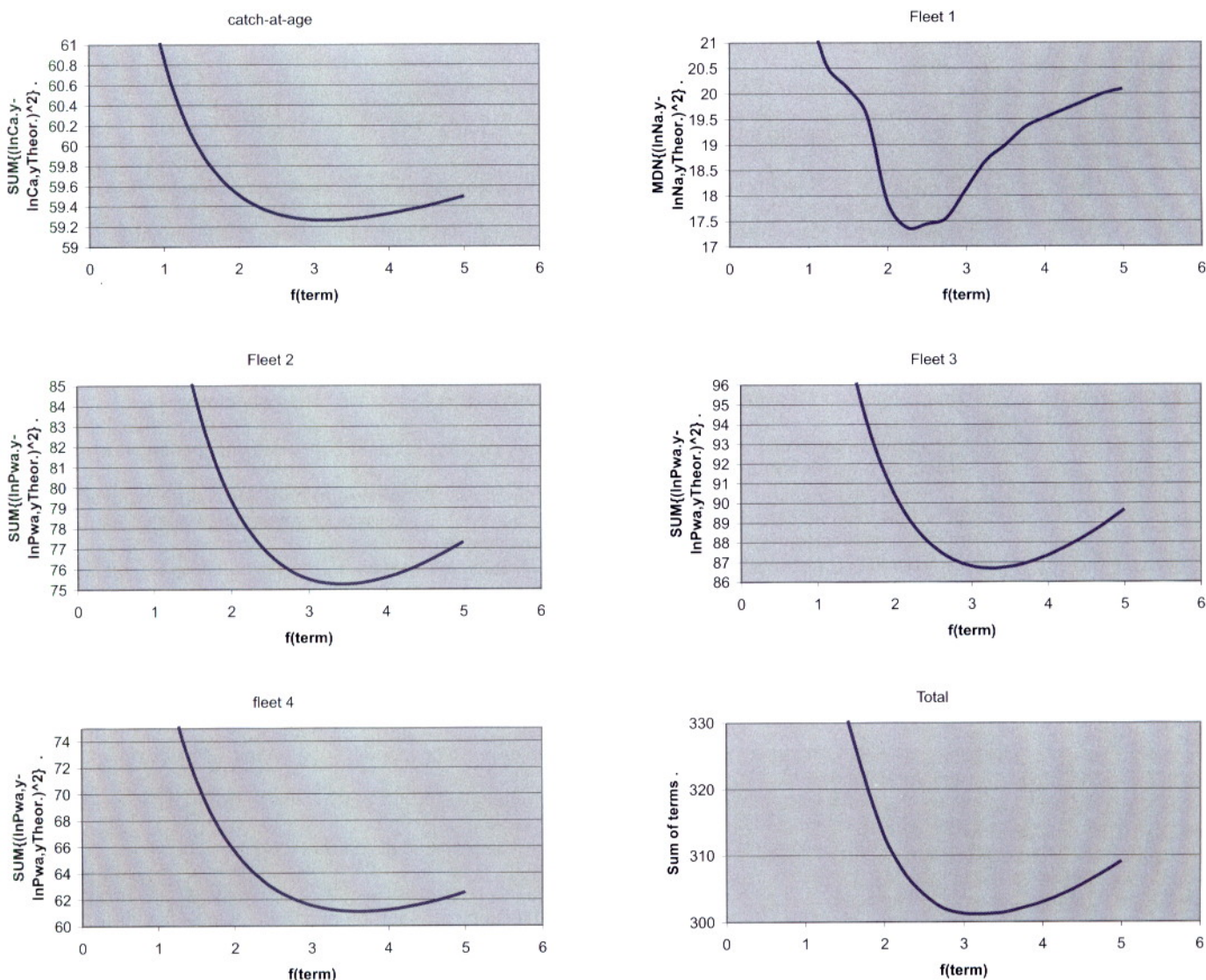
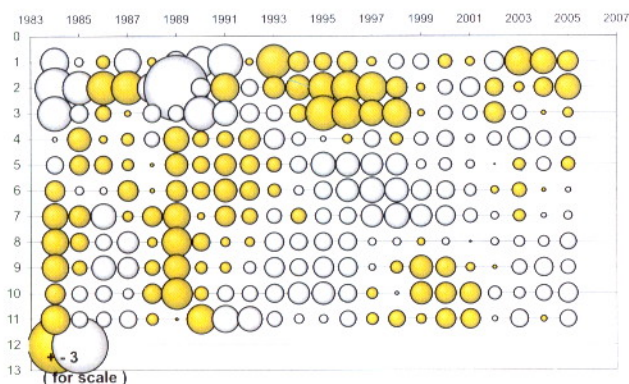


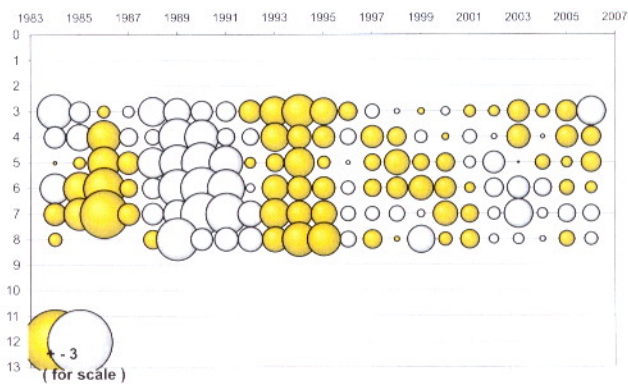
Рис. 1. Профили компонент целевой функции модели

Модель	<b>TISVPA</b>
Версия	<b>2006.1</b>
Тип модели	Сепарабельная модель применена к одному или двум периодам. Сепарабельная модель захватывает весь период анализа. Имеется возможность включить третий, зависящий от поколения, фактор.
Коэффициенты селективности	Коэффициент селективности для старшей возрастной группы приравнен к предыдущему. Коэффициенты селективности по возрастным группам нормированы по сумме на единицу. Для плюс-группы принимается та же промысловая смертность, что и для предыдущей возрастной группы. <b>Если в модель включены факторы поколения, то <math>s(a,y) = s(a)g(\text{cohort})</math>;</b> $s(a,y)$ могут быть нормализованы для каждого года по сумме на 1 (подмодель «внутригодового перераспределения усилия») или нет (подмодель «увеличения (снижения) коэффициента селективности»). Матрица $g$ -факторов нормализована на среднее = 1.
<b>Оцениваемые параметры</b>	
Коэффициенты улавливаемости	Могут оцениваться или быть приняты равными единице. Коэффициенты улавливаемости оцениваются аналитически как экспоненты средних логарифмических остатков между оценками численности, полученными из уловов и съемок.
Плюс-группа	Плюс-группа не моделируется, но ее численность рассчитывается из уловов в предположении о равенстве промысловой смертности для плюс-группы и старшей группы.
Съемки биомассы нерестового запаса (SSB)	Могут рассматриваться как абсолютные или относительные индексы. Во втором случае коэффициент пропорциональности рассчитывается аналитически как экспонента среднего логарифмического остатка между оценками SSB, полученными из данных по возрастному составу уловов и по съемкам.
Съемки в (терминальный+1) год	Могут использоваться.
Целевая функция	Целевой функцией является взвешенная сумма компонентов. Для данных по возрастному составу уловов соответствующими компонентами могут быть: <ul style="list-style-type: none"> <li>•сумма квадратов остатков в логарифмах уловов (<math>SS</math>)</li> <li>•медиана распределения квадратов остатков в логарифмах уловов (<math>MDN</math>)</li> <li>•абсолютное медианное отклонение (<math>AMD</math>).</li> </ul> <p>Для оценок SSB по съемкам – сумма квадратов остатков между логарифмами оценок SSB по съемкам и по модели. Для съемок с возрастной структурой – <math>SS</math>, <math>MDN</math> или <math>AMD</math> для логарифмов <math>N(a,y)</math> или для возрастных пропорций запаса (не взвешенных или взвешенных по численности).</p>
Оценка неопределенности	Для оценки неопределенности применен параметрический условный бутстреп относительно возрастного состава уловов (в предположении, что данные распределены логнормально, дисперсия оценивается в базовом прогоне модели) вместе с зашумлением дополнительной информации (в предположении, что ошибки в данных имеют логнормальное распределение, значение дисперсии задается пользователем).
Другие аспекты	Для данных по возрастному составу уловов могут использоваться три модели ошибки: <ul style="list-style-type: none"> <li>•ошибки отнесены к данным по возрастному составу уловов. Это чисто сепарабельная модель («версия с управляющими уловами»)</li> <li>•ошибки отнесены к сепарабельной модели промысловой смертности. Это соответствует обычной VPA, но сепарабельная модель используется для оценки терминальных значений промысловой смертности («версия с управляющими уловами»)</li> <li>•ошибки отнесены к обоим источникам («смешанная версия»). Для каждой возрастной группы и года промысловая смертность оценивается по когортным уравнениям (в аппроксимации Поупа). Конечная оценка является взвешенным средним между двумя оценками, веса задаются пользователем или обратно пропорциональны квадрату остатка в каждой точке.</li> </ul> <p>Относительно ограничений на остатки в возрастном составе уловов возможны четыре варианта:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Достигаются нулевые суммы остатков по всем годам и возрастам между оценками промысловой смертности из когортных уравнений и по сепарабельной модели («несмещенная сепарабеллизация»);</li> <li>2. Как в варианте 1, но относительно логарифмических остатков в возрастном составе уловов (достигается несмещенность оценок численности);</li> <li>3. Как в варианте 1, но отклонения взвешиваются по возрастным оценкам селективности;</li> <li>4. Отсутствие ограничений на смещение.</li> </ol> <p>В версии TISVPA, в варианте 2, нулю также равны когортные суммы остатков. В вариантах 1, 2, и 3, если для оценки <math>g</math>-факторов использован не весь возрастной диапазон, перечисленные выше условия в смысле несмещенности могут выполняться не точно для <math>s(a,y)</math>, но по-прежнему выполняются для не зависящих от поколений оценок <math>s(a)</math>.</p>
Язык	Visual Basic

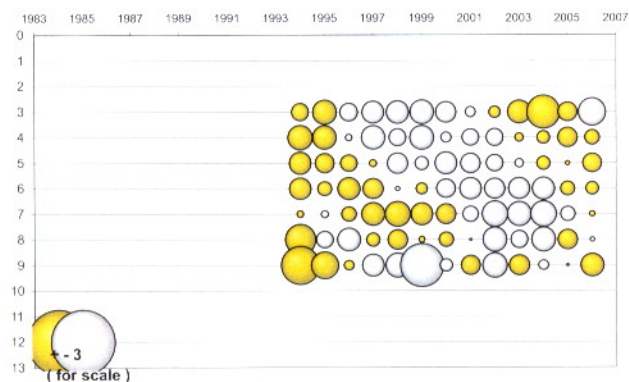
Остатки описания моделью  $\text{LnC}(a,y)$



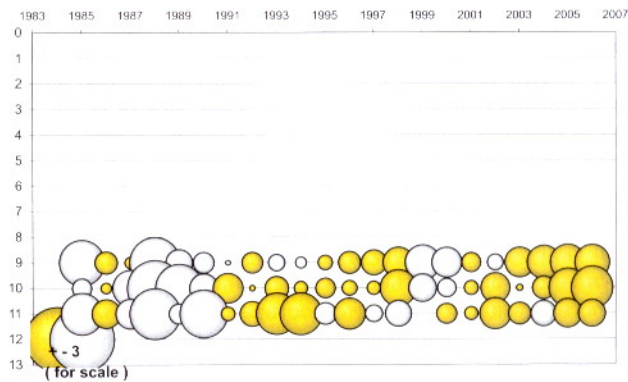
Остатки описания моделью  $\text{LnN}(a,y)$  для флота 2



Остатки описания моделью  $\text{LnN}(a,y)$  для флота 4



Остатки описания моделью  $\text{LnN}(a,y)$  для флота 1



Остатки описания моделью  $\text{LnN}(a,y)$  для флота 3

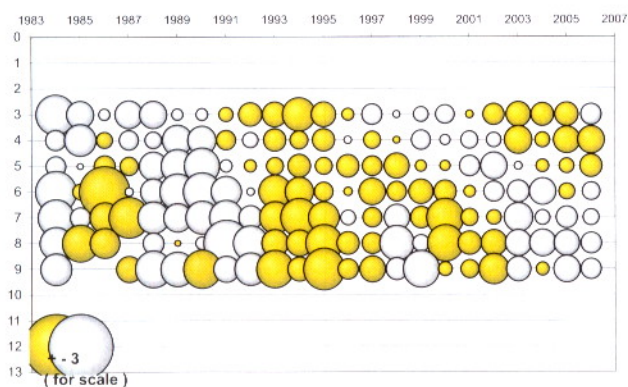


Рис. 2. Графики остатков модельного описания различных видов входных данных

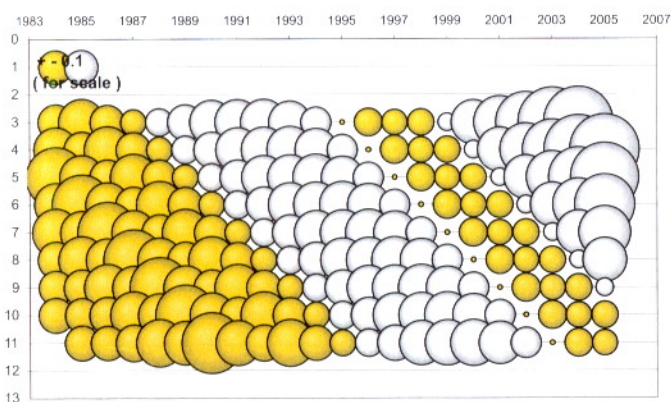


Рис. 3. Оценки  $g$ -факторов (представлены как  $g-1$ ). Величина  $g-1$  означает отсутствие коррекции матрицы селективности на фактор поколения

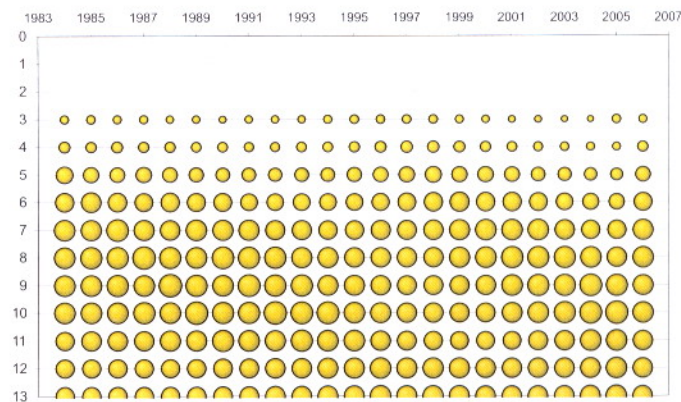


Рис. 4. Оценки матрицы селективности промысла

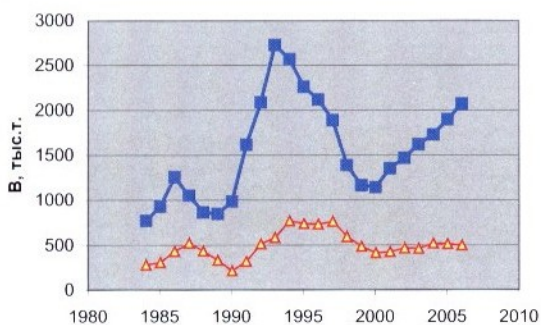


Рис. 5. Результаты оценки запаса с помощью модели TISVPA

и на Лофотенах (флот 3) и российские донные траловые съемки (флот 4). В настройке использовались все имеющиеся данные, в то время как расчет по модели XSA проводился по ограниченному интервалу лет (начиная с 1997 г.).

В модели TISVPA  $g$ -факторы оценивались для диапазона возрастов 3–11 лет, поскольку в младших возрастах обилие вклад «дополнительных» уловов, отражающих каннибализм, а данные по уловам старших возрастных групп и +группы, как правило, наиболее «зашумлены», что снижает устойчивость оценок.

Выбранный вариант модели допускает с равной вероятностью наличие ошибки и в данных по возрастному составу уловов, и в сепарабельном описании промысловой смертности (*mixed*-опция) с обеспечением несмещенности описания моделью логарифмов возрастного состава уловов. Для данных по возрастному составу уловов четкий минимум соответствующей компоненты целевой функции модели хорошо проявлен уже при обычной минимизации суммы квадратов остатков в логарифмах данных по возрастному составу уловов (рис. 1). Для флота 1 минимизировалась медиана распределения квадратов остатков описания моделью логарифмов индекса численности. Для флотов 2, 3 и 4 единственной опцией, выявившей минимумы (т.е. позволяющей избежать вырождения решения из-за значительных ошибок), оказалась минимизация суммы квадратов остатков в описании моделью логарифмов взвешенных по численности запаса возрастных пропорций (на рисунках возрастные пропорции, взвешенные по численности, обозначаются как  $Pw(a,y)$ ). Это вызвано, по-видимому, значительными межгодовыми изменениями в условиях проведения съемок, приводящими к существенным различиям в абсолютных оценках индексов численности. При этом данные о возрастном составе, выраженном в долях (пропорциях), могут оставаться более надежными.

**Результаты**

Как можно видеть из рис. 1, все источники информации (данные по возрастному составу уловов и четыре вида дополнительных данных) несут в себе взаимно непротиворечивую информацию о состоянии запаса (положения минимумов соответствующих компонент целевой функции модели практически совпадают). Это позволяет с более высоким доверием относиться к выбранным опциям модели и полученным результатам.

Остатки описания моделью всех видов использованных данных представлены на рис. 2. Как можно видеть, остатки описания моделью данных по возрастному составу уловов не содержат заметных когортных структур, т.е. использование факторов поколений позволяет эффективно учесть в модели возможные различия во взаимодействии различных поколений с промыслом. Оценки факторов поколений ( $g$ -факторов) представлены на рис. 3. Использование в модели факторов поколений в сепарабельном представлении промысловой смертности позволяет перейти от сравнительно жесткой зависимости селективности промысла от возраста, присущей обычным сепарабельным моделям, к адаптированной к реальным условиям матрице селективности (рис. 4).

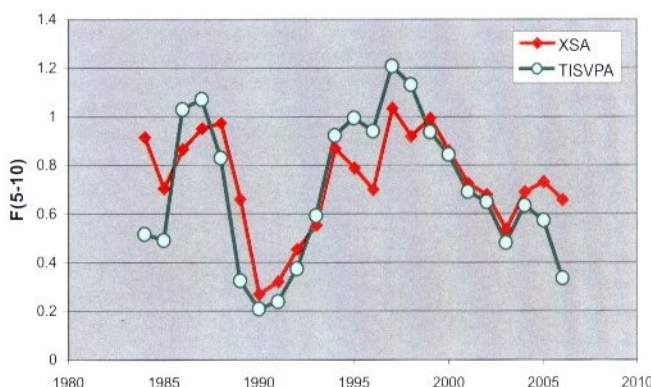
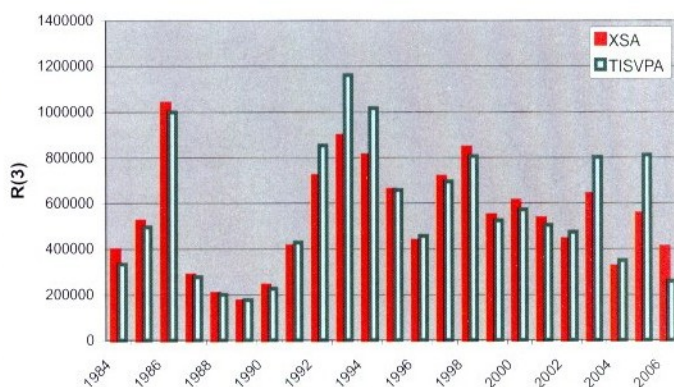
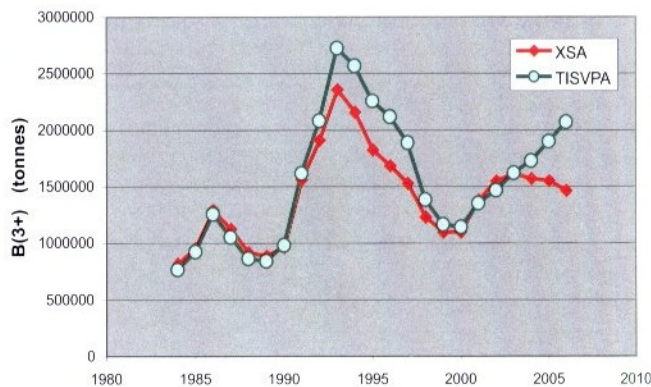
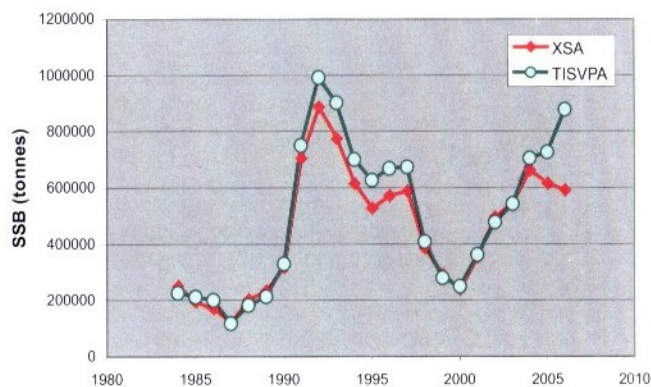


Рис. 6. Сравнение оценок запаса трески, полученных по моделям XSA и TISVPA. Для сравнения выбран прогноз SVPASA15/15, принятый Рабочей группой ICES (2007) в качестве финального и учитывающий российские оценки несообщенного вылова

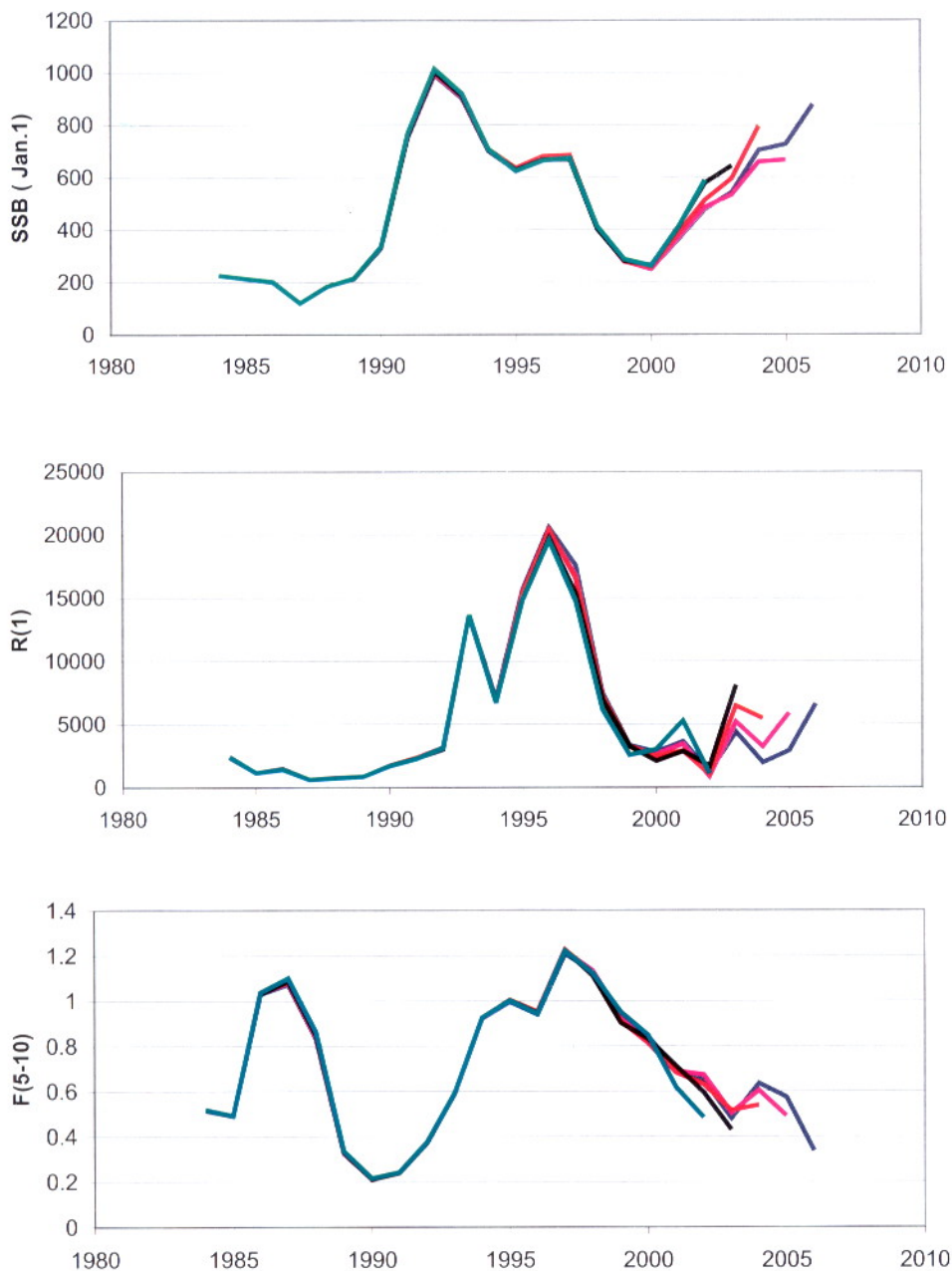


Рис. 7. Результаты ретроспективного анализа

Отметим, что высокие оценки «селективности» для возрастных групп 1 и 2 (см. рис. 4) не отражают воздействие промысла, а являются результатом включения в матрицу уловов оценок убыли от каннибализма.

Результаты оценки промыслового запаса трески (в возрасте 3 лет и старше), полученные с помощью модели *TISVPA*, представлены на рис. 5. На рис. 6 полученные по модели *TISVPA* оценки представлены в сравнении с результатами модели *XSA* [ICES, 2007]. Отметим общее подобие трендов изменений биомассы нерестового запаса, промыслового запаса (B3+) и промысловой смертности, оцененных по обеим моделям, за исключением оценок 2005 и 2006 гг. Модель *XSA* говорит о снижении запаса начиная с 2004 г., а результаты, полученные по модели *TISVPA*, свидетельствуют о продолжении тенденции к его росту. Причем, биомасса нерестового запаса в 2006 г. приближается к исторически максимальной на рассмотренном периоде величине 1992 г.

Обе модели показывают снижение промысловой смертности в 2006 г., однако по результатам модели *TISVPA* это снижение более ярко выражено.

Ретроспективный анализ показывает достаточно хорошую устойчивость результатов: на рис. 7 представлены полученные по модели *TISVPA* оценки биомассы нерестового запаса, численности пополнения в возрасте 1 год и промысловой смертности при последовательном отбрасывании данных, относящихся к 2006, 2005, 2004 и 2003 гг.

Анализ неопределенности полученных результатов, проведенный с помощью процедуры условного параметрического бутстреп-а, показал приемлемую надежность оценок с сохранением тенденций изменения биомассы запаса, полученных в основном прогнозе модели. На рис. 8 представлены результаты бутстреп-анализа неопределенности оценок биомассы нерестового запаса, зависимости селективности промысла от возраста, а также оценок численности возрастных групп в запасе в 2006 г. Отметим, что оценки селективности промысла (в зависимости от возраста) имеют весьма узкие доверительные интервалы, т.е. весьма устойчивы, что подтверждает адекватность применения сепарабельных моделей для оценки запаса трески.

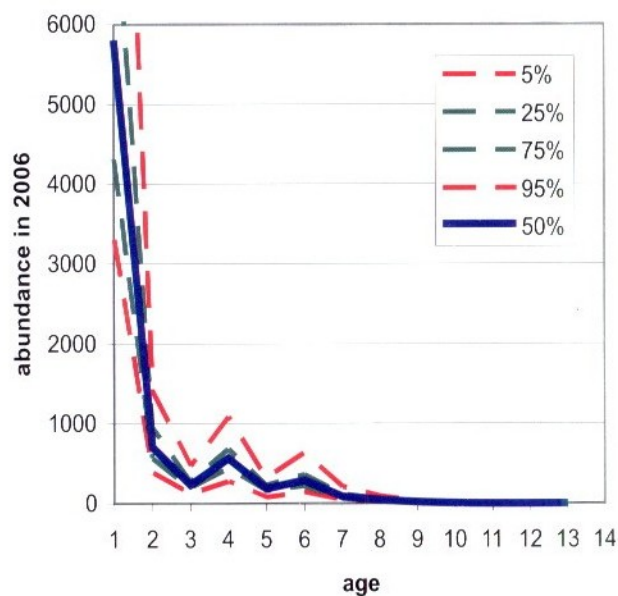
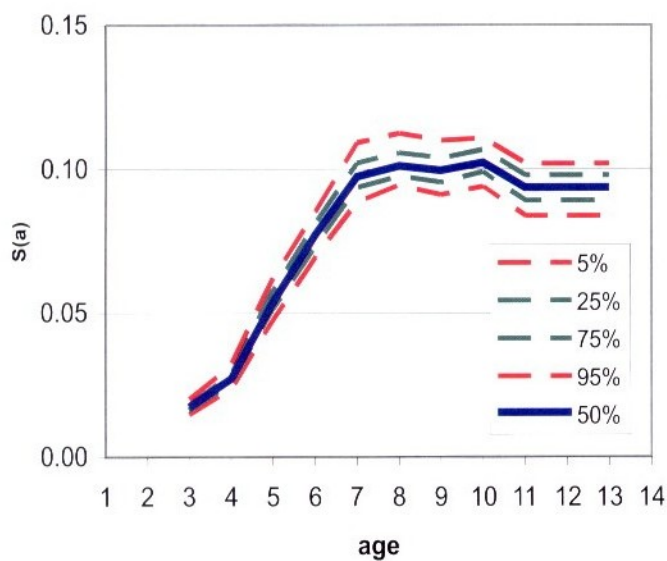
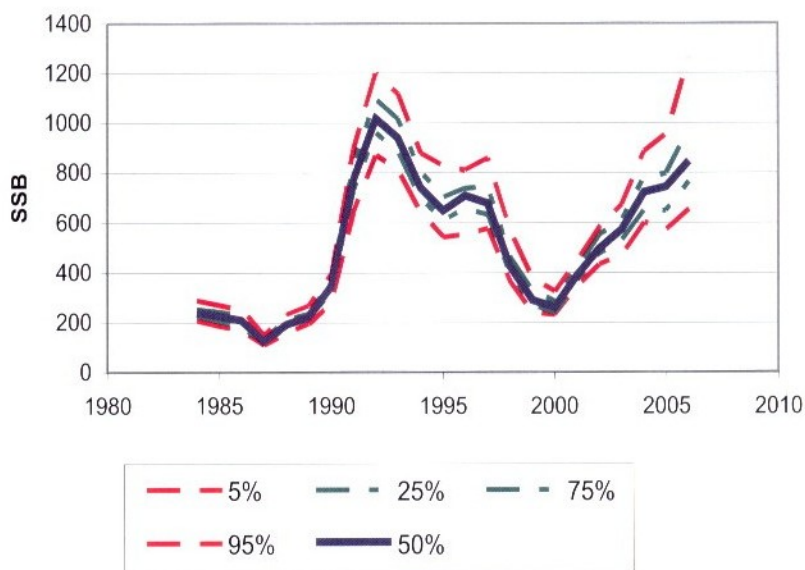


Рис. 8. Бутстреп-оценки неопределенности в результатах

**Заключение**

Как показывают результаты проведенного нами анализа, учет специфики различных поколений в их взаимодействии с промыслом в расчетах величины запаса приводит к существенно более высоким оценкам биомассы нерестового запаса для последних лет по сравнению с оценками, полученными Арктической рабочей группой ИКЕС по модели XSA по тем же данным (878 тыс. т против 535 тыс. т на 2006 г.). Оценка же общего запаса оказывается в 1,6 раза выше: 2072 тыс. т против 1298 тыс. т.

Модель XSA, традиционно используемая Рабочей группой по арктическому рыболовству ИКЕС для оценки запаса трески, является лишь одной из множества моделей, используемых в настоящее время в мировой практике, к тому же не лишенной весьма существенных недостатков. Результаты оценки запаса трески, полученные нами с использованием модели TISVPA (сепарабельная когортная модель, основанная на робастном подходе к выделению информации, заключенной в используемых данных) показывают, что полученные по модели XSA результаты вполне могут оказаться ошибочными и едва ли должны считаться единственной и надежной основой для принятия управленческих решений по регулированию промысла баренцевоморской трески.

**Vasilyev D.A., Bulgakova T.I.**

**Alternative assessment of the Barents Sea cod stock by the TISVPA model**

The XSA-model, having been traditionally used by the Work Group of ICES, is one of many models being used today for the Barents Sea cod assessment. It has some weaknesses, though.

The authors consider the TISVPA (Triple Instantaneous Separable VPA) model based on robust approach to extracting information from the data being used. It represents exploitation coefficients as a product of three parameters –  $f(\text{year}) \times s(\text{age}) \times g(\text{cohort})$ , giving the opportunity to estimate the auxiliary set of generation parameters.

The results of the analysis show that if the terms of interaction between specific generations and fishery are included in the computational procedure, estimates of the spawning stock biomass turn out to be substantially higher than those obtained by ICES Work Group on the base of XSA-model (878 thou. t versus 535 thou. t in 2006).