

COMBI 4.0

ИНСТРУКЦИЯ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

1. Введение.

Обобщенные продукционные модели. Истоки математической теории продукционных моделей можно обнаружить в работах Вольтерра (Volterra, 1928), посвященных анализу системы "хищник–жертва", и в известной аксиоме Рассела (Russel, 1931), постулирующей условие динамического равновесия эксплуатируемого запаса. Опираясь на представления о механизмах изменения запаса под влиянием как внутренних, так и внешних причин, скорость изменения его биомассы можно записать в виде:

$$dB/dt = B[r(B) + g(B) - M(B) - F(E)],$$

где B – биомасса облавливаемой части запаса; r , g , M – мгновенные скорости протекания основных популяционных процессов: пополнения, индивидуального роста особей и естественной смертности как функций текущей величины биомассы; F – мгновенный темп убыли запаса в результате промысла как функция промыслового усилия (E).

Первые три слагаемых в квадратных скобках приведенного уравнения характеризуют процессы, в совокупности контролирующие естественную динамику запаса, на которую промысел влияет через уменьшение биомассы. В продукционных моделях эти процессы принято учитывать с помощью интегральной функции роста:

$$G(B) = r(B) + g(B) - M(B).$$

Таким образом, общая формулировка модели приобретает вид

$$dB/dt = B[G(B) - F(E)].$$

Очевидно, что конкретный вид продукционной модели зависит от выбора функций продуктивности запаса, $G(B)$, и промысла, $F(E)$.

Состояние равновесия между запасом и промыслом задается условием

$$dB/dt = 0.$$

Этому состоянию соответствует так называемый уравновешенный улов Y , равный чистому естественному приросту биомассы запаса за рассматриваемый интервал времени:

$$Y = BG(B) - BF(E).$$

Использование продукционных моделей в практике оценивания состояния запасов и определения оптимальных режимов рыболовства имеет достаточно давнюю историю: одна из первых работ, заложивших концептуальные основы данного подхода, принадлежит Грэхему (Graham, 1935). Грэхем, анализируя данные тралового промысла в Северном море, исходил из предположения о том, что мгновенный удельный темп продуцирования $\frac{1}{B} \frac{dB}{dt}$ прямо пропорционален разности между емкостью среды и текущей величиной биомассы запаса:

$$\frac{1}{B} \frac{dB}{dt} = r B_{max} - B .$$

В дальнейшем на основе развития этой концепции сформировался современный арсенал моделей прибавочной продукции.

Несмотря на определенный скептицизм в отношении их применимости, связанный с аналитической простотой и характером исходных допущений (напр., Laloë, 1995), опыт использования обобщенных продукционных моделей (в том числе в рамках международных комиссий ICCAT, IATTC, ICSEAF) свидетельствует об их важном значении в анализе систем «запас–промысел», особенно в ситуациях, когда данные о возрастном составе уловов отсутствуют или ненадежны. В настоящее время методы продукционного моделирования входят в списки рекомендованных к использованию в ряде международных рыбохозяйственных организаций, в том числе в ИКЕС (ICES, 2012).

В современный период развитие продукционных моделей осуществляется в направлениях объективизации используемых продукционных функций; совершенствования процедур параметризации; расширения моделей

применительно к многовидовому промыслу; включения в модельные построения информации о факторах внешней среды. В последние годы появились разработки, ставящие целью преодоление одного из базовых ограничений метода – предположения о равномерном распределении плотности биомассы на исследуемой акватории. Поводом для этого послужило развитие математико-картографических методов и ГИС-технологий, позволяющих эффективно выделять пространственные зоны, различающиеся темпами продуцирования, и анализировать их динамику (напр., Corsi, 2000).

Динамические продукционные модели. В традиционном, общепринятом варианте продукционные модели служат лишь для описания частного случая – равновесного состояния запаса. В этом качестве они могут использоваться исключительно для анализа долгопериодных изменений продуктивности запаса в связи с различными режимами регулирования. В рамках такого анализа предполагается, что при изменении интенсивности промысла запас мгновенно переходит из одного устойчивого состояния в другое, минуя промежуточные, неуровновешенные состояния. Возможности динамических моделей значительно шире. Динамические модификации позволяют оценить не только уравнивающиеся состояния запаса, но и промежуточные, т.е. проследить траекторию запаса от исходного состояния равновесия к новому, что, в частности, может быть использовано в прогностических целях.

Для того чтобы вывести уравнение возможных уловов для неуровновешенных условий, Уолтер (Walter, 1976) рассматривал биомассу как непрерывную функцию времени $B = B(t)$. Это позволило ему, решив уравнение Шефера $dB/Bdt = r(1 - B/K) - qE$ относительно B и выполнив необходимые преобразования, получить

$$Y_i = \frac{qEK}{r} (r - qE) + \frac{qEK}{r} \ln \frac{B_{i-1}}{B_i}$$

где B_{i-1} , B_i – биомасса запаса в начале и конце года i .

Первое слагаемое в приведенном уравнении представляет собой оценку улова при равновесных условиях, тогда как второе слагаемое определяет от-

клонение возможного улова от равновесного в зависимости от величины и знака изменений биомассы запаса за год.

Модификация Шнютте (Schnute, 1977, 1979) разработана на базе модели Шефера, однако предложенный подход применим и к более сложным моделям. Если записать модель Шефера в терминах улова на усилие и проинтегрировать полученное выражение $dU/dt = rU(1 - U/qK) - qEU$ в пределах $i \leq t \leq i + 1$, можно от непрерывной модели перейти к дискретной с шагом 1 год:

$$\ln \frac{U_{i+1}}{U_i} = r - qE_i - \frac{r}{qK} U_i$$

где U_i – средний улов на усилие в год i .

Определив двумя способами связь между среднегодовыми значениями улова на усилие и значениями этого показателя в начале годовых интервалов, Шнютте получил следующие динамические модификации приведенного выше уравнения:

$$\ln \frac{U_{i+1} + U_i}{U_i + U_{i-1}} = r - qE_i - \frac{r}{qK} U_i, \quad U_i \approx \frac{U_i + U_{i-1}}{2}$$

$$\ln \frac{U_{i+1}}{U_i} = r - q \frac{E_i + E_{i+1}}{2} - \frac{r}{qK} \frac{U_i + U_{i+1}}{2}, \quad U_i \approx \sqrt{U_i U_{i+1}}$$

Модель Баттерворта и Эндрю (Butterworth, Andrew, 1984) в известном смысле является развитием подхода Шнютте и состоит из двух уравнений:

$$B_{i+1} = B_i + G(B_i) - C_i$$

$$U_i = q \frac{B_{i+1} + B_i}{2}$$

где B_i, B_{i+1} – биомасса запаса на начало i и $(i + 1)$ года; U_i – средняя величина улова на усилие в i -м году. Подставляя в первое уравнение вместо $G(B)$ выражения $G(B) = rB(1 - B/K)$ или $G(B) = rB(1 - \ln B/\ln K)$ можно получить динамические версии соответствующих моделей Шефера и Фокса.

Другую версию подхода Шнютте предложили Бабаян и Кизнер (Babayan, Kizner, 1988), использовав в качестве второго уравнения системы соотношение $B_{i+1} = (U_{i+1} + U_i)/2q$, что придало модели некоторые новые

свойства, в частности, позволило существенно упростить процедуру оценки параметров. Данный подход реализован в программе COMBI.

2. Методологические основы.

В прикладной программе COMBI 4.0 реализована процедура обоснования и расчета общего допустимого улова (ОДУ) водных биологических ресурсов на основе использования динамических продукционных моделей. Программа рекомендуется к применению в тех ситуациях, когда информационное обеспечение обоснования прогноза ОДУ соответствует II-му уровню. «II-й уровень: Доступная информация обеспечивает проведение ограниченного аналитического оценивания состояния запаса и ОДУ с использованием продукционных моделей эксплуатируемого запаса. Минимальные требования к составу информации на данном уровне: исторические ряды уловов и уловов на единицу промыслового усилия (или промысловых усилий)» (Приложение 1 к Приказу Федерального агентства по рыболовству № 104 от 6 февраля 2015 г.).

Название программы обязано своим происхождением комбинированному подходу к обоснованию ОДУ, сочетающему в себе принципы предосторожности в управлении рыболовством, элементы многокритериальной оптимизации стратегий управления (MSE – management strategy evaluation), а также основные положения концепции MSY (maximum sustainable yield) в ее современной интерпретации (рис. 1).

Алгоритмом программы предусмотрены все необходимые этапы обоснования величины ОДУ, предусмотренные приказом № 104, включая оценку качества исходных данных, определение вида модели, используемой для анализа состояния и динамики исследуемой системы «запас–промысел», оценку ориентиров управления, обоснование правила регулирования промысла (ПП), оценку эффективности принятой схемы управления и прогнозирования биомассы запаса и улова с заданной заблаговременностью. Процедура, тем не менее, не является полностью автоматизированной и на каждом из

этапов требует от пользователя принятия осознанного, взвешенного решения относительно выбора «наилучшего» варианта расчетов.

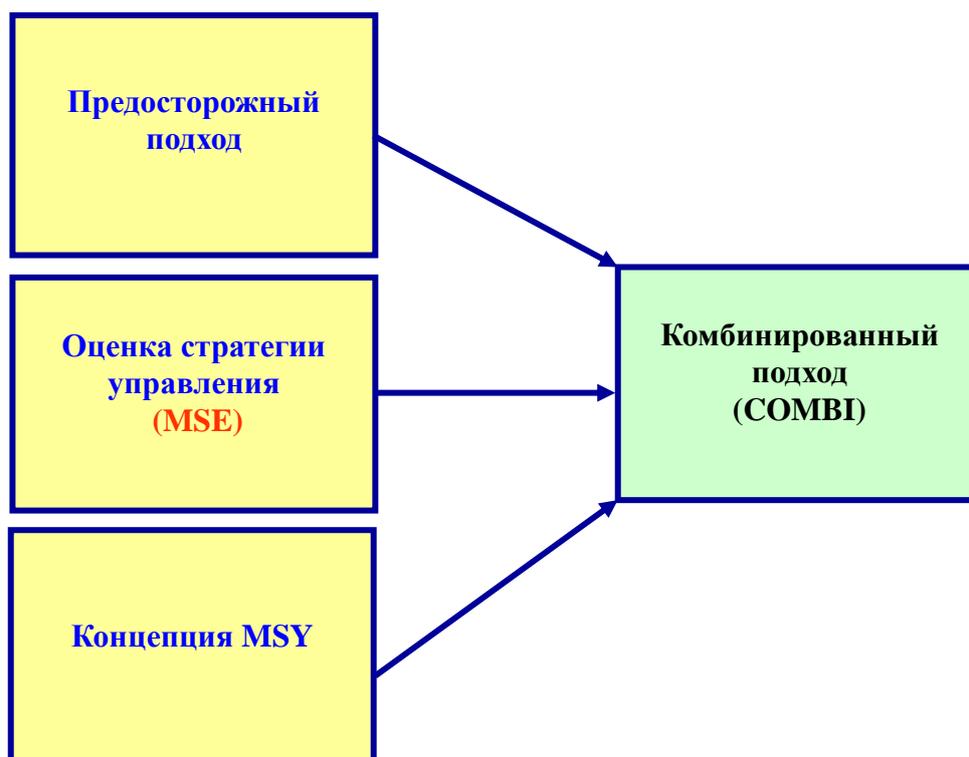


Рис. 1. Концептуальные составляющие комбинированного подхода к обоснованию ОДУ.

В текущей версии программы COMBI предусмотрено использование трех продукционных моделей:

1) Модели Шефера (Schaefer, 1954), основанной на логистическом законе популяционного роста,

$$dB/dt = rB \cdot (1 - B/K) - qEB;$$

2) Модели Фокса (Fox, 1970), в которой логистическая функция популяционного роста заменена на функцию Гомперца (Gompertz, 1825), что приводит к нелинейной зависимости производительности промысла от величины промыслового усилия

$$dB/dt = rB \cdot (-\ln(B/K)) - qEB \text{ и}$$

3) Обобщенной модели Пелла-Томлинсона (Pella, Tomlinson, 1969), в которой для описания популяционного роста принято уравнение Ричардса (Richards, 1959), что придает модели дополнительную степень свободы и позволяет генерировать целое семейство кривых устойчивого улова

$$dB/dt = rB \cdot (1 - (B/K)^a) - qEB,$$

где B – текущее значение биомассы запаса, r – мгновенный коэффициент популяционного роста, K – уравновешенная биомасса девственного запаса (емкость среды), q – коэффициент улавливаемости, E – величина промыслового усилия. Стационарные (равновесные) версии данных моделей используются программой для оценки ориентиров управления промыслом, динамические версии – для ретроспективного восстановления изменений биомассы запаса, а также для прогнозирования будущих состояний системы «запас–промысел».

Как было упомянуто выше, необходимые для работы программы данные включают в себя временные ряды промысловых усилий и уловов на единицу усилия. Очевидно, что качеством исходной информации во многом определяется адекватность результирующих оценок ОДУ. В этой связи при подготовке данных для анализа рекомендуется проводить предварительную стандартизацию уловов на единицу промыслового усилия с целью «отфильтровывания» факторов, не связанных с величиной запаса. Процедура стандартизации обычно реализуется с помощью методов, представляющих собой современное развитие многофакторного линейного анализа, в частности с помощью обобщенных линейных моделей (GLM – generalized linear models).

Блок-схема, иллюстрирующая последовательность операций расчетной процедуры COMBI, представлена на рис. 2.

3. Работа с программой.

Интерфейс программы организован в виде ряда вкладок, каждая из которых становится доступной после выполнения необходимых действий на предыдущей вкладке. **Важно:** в текущей версии COMBI реализовано взаимодействие с программной средой R, средствами которой осуществляется выполнение некоторых опций программы; полный набор опций, таким образом, доступен только при наличии на компьютере пользователя установленного пакета R (распространяется бесплатно через сайт www.cran.r-project.org).



Рис. 2. Блок-схема процедуры COMBI.

3.1. Вкладка Данные.

Предназначена для загрузки, редактирования и визуализации данных, используемых в последующем анализе.

Загрузка данных осуществляется из внешнего файла с помощью последовательности команд: **Меню: Файл → Открыть**. В открывающемся диалоговом окне следует выбрать загружаемый файл. Файл данных должен быть оформлен в текстовом формате (расширение .txt – рекомендуемое приложение Блокнот (Notepad)) и содержать необходимую для анализа информацию в виде временных рядов уловов на единицу промыслового усилия, величины промыслового усилия и величины общего вылова, отнесенных к соответствующему году наблюдений. **Важно:** число строк, резервированных под разделы СПРАВКА и РАЗМЕРНОСТЬ, должно оставаться фиксированным (см. образец оформления файла ниже); ряд наблюдений должен быть непрерывным; в конце файла не должно быть пустых строк. Образец оформления файла данных представлен на рис. 3.

```

-----СПРАВКА-----
ВИД

ЗАПАС

СЕЗОН

РАЙОН

ДАнные

ИСТОЧНИК

-----РАЗМЕРНОСТЬ-----
0
-----
ГОД      УЛОВ НА УСИЛИЕ  УСИЛИЕ  УЛОВ
1994    48      100      4800
1995    75      106      7970
1996    68      272     18401
1997    65      140      9084
1998    85      154     13058
1999    70      234     16547
2000    80      163     13054
2001    77      132     10104
2002    95      174     16476
2003    71      185     13176
2004   100      116     11560
2005    81      194     15650
2006    96      114     10929
2007    91      268     24515
2008    65      111      7163
2009   115      158     18156
2010    53      283     15093
2011   114      173     19716
2012    39      254      9800
2013   130      165     21376

```

Рис. 3. Образец оформления файла с исходными данными.

Визуализация исходных временных рядов осуществляется нажатием одной из кнопок, расположенных в нижней части окна программы. По выбору пользователя на соответствующих диаграммах отображается временная динамика уловов на единицу промыслового усилия (кнопка $U = f(t)$), величины промыслового усилия (кнопка $E = f(t)$) и скаттер точек, иллюстрирующий зависимость между уловом на усилие и собственно усилием (кнопка $U = f(E)$) (рис. 4).

Здесь следует подчеркнуть необходимость внимательного отношения к структуре входных данных для моделирования. Во многих случаях проблемы неадекватности результирующих оценок ориентиров управления оказываются связанными не с дефектами моделей как таковых, а с дефектами данных (Hilborn, 1979). Подобного рода проблемы могут возникать, например, при отсутствии достаточной «контрастности» временных рядов, т.е. при отсутствии выраженных изменений величины промыслового усилия на фоне изменений биомассы запаса. Предпочтительно, чтобы ряды наблюдений охватывали периоды, когда биомасса запаса находится как ниже уровня B_{MSY} , так и выше него, а также содержали сегменты данных, демонстрирующих возрастание индексов обилия (ICES, 2012). Одна из проблемных, но, к сожалению, достаточно типичных ситуаций, приводящих к сильно смещенным оценкам параметров модели, возникает при работе с данными, демонстрирующими постоянное увеличение промыслового усилия при столь же постоянном снижении улова на усилие (one-way-trip). В любом случае, для анализа степени смещенности оценок считается полезным (и даже обязательным) провести тестирование модели на имитационных наборах данных, сгенерированных на основе значений параметров, определенных при выполнении оптимизационной процедуры (Hilborn, Walters, 1992).

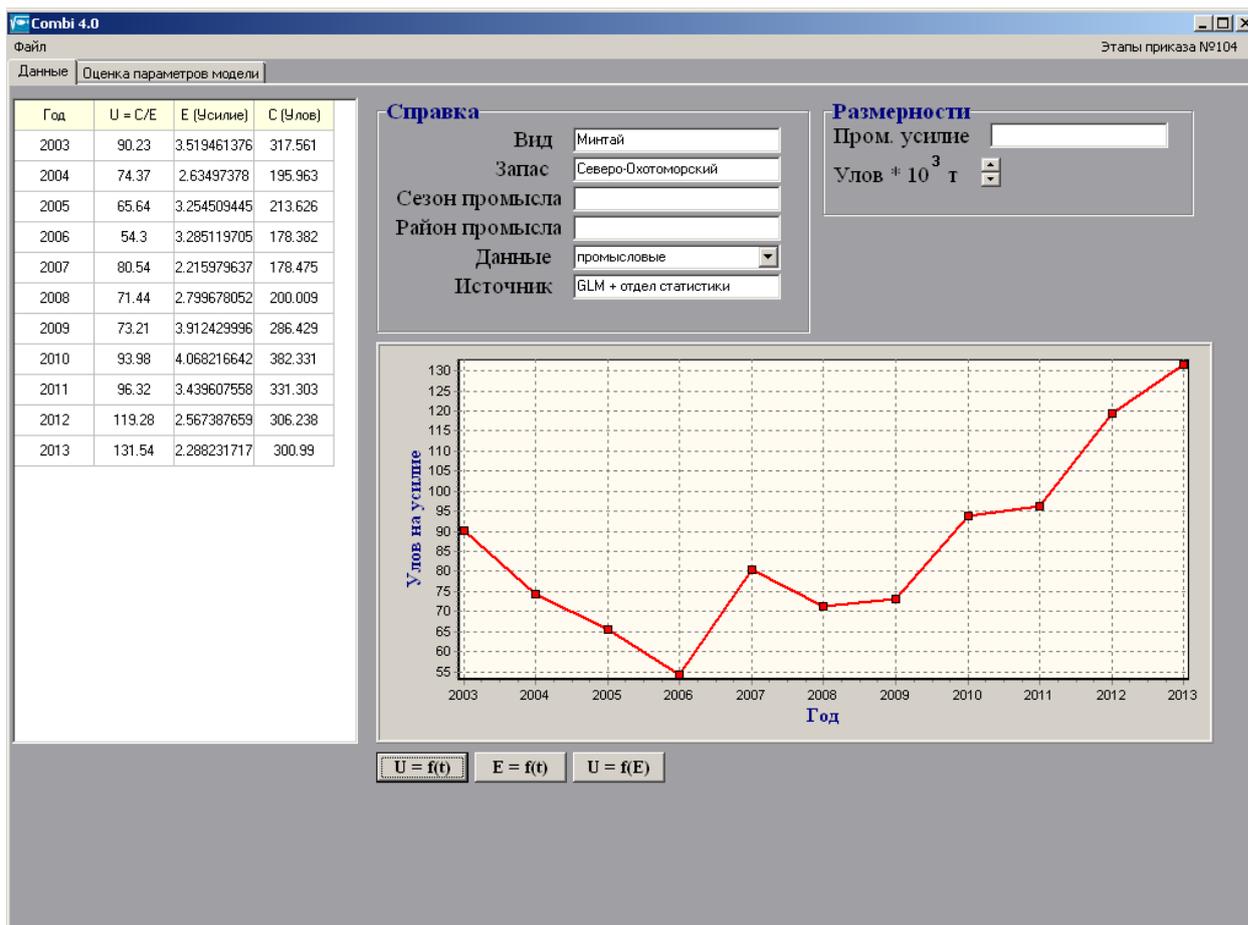


Рис. 4. Внешний вид вкладки **Данные**.

Программой предусмотрена возможность *редактирования* входных данных, которое приводит к автоматическому переписыванию массивов, передаваемых в последующие аналитические модули. Измененные данные могут быть записаны в файл с помощью последовательности команд: **Меню: Сохранить** (данные записываются в файл с прежним именем) либо **Меню: Сохранить как** (данные записываются в новый файл с именем, задаваемым пользователем).

3.2. Вкладка **Оценка параметров модели**.

Предназначена для выбора и параметризации модели, наилучшим образом описывающей наблюдаемые данные. Предварительным критерием для выбора модели могут служить значения коэффициентов корреляции между величинами U и E , отображаемые при раскрытии вкладки в ее верхнем левом углу (рис. 5). **Важно:** неотрицательность коэффициентов корреляции указы-

вает на нарушение исходных предпосылок продукционных моделей и, соответственно, на невозможность их использования для анализа имеющегося набора данных.

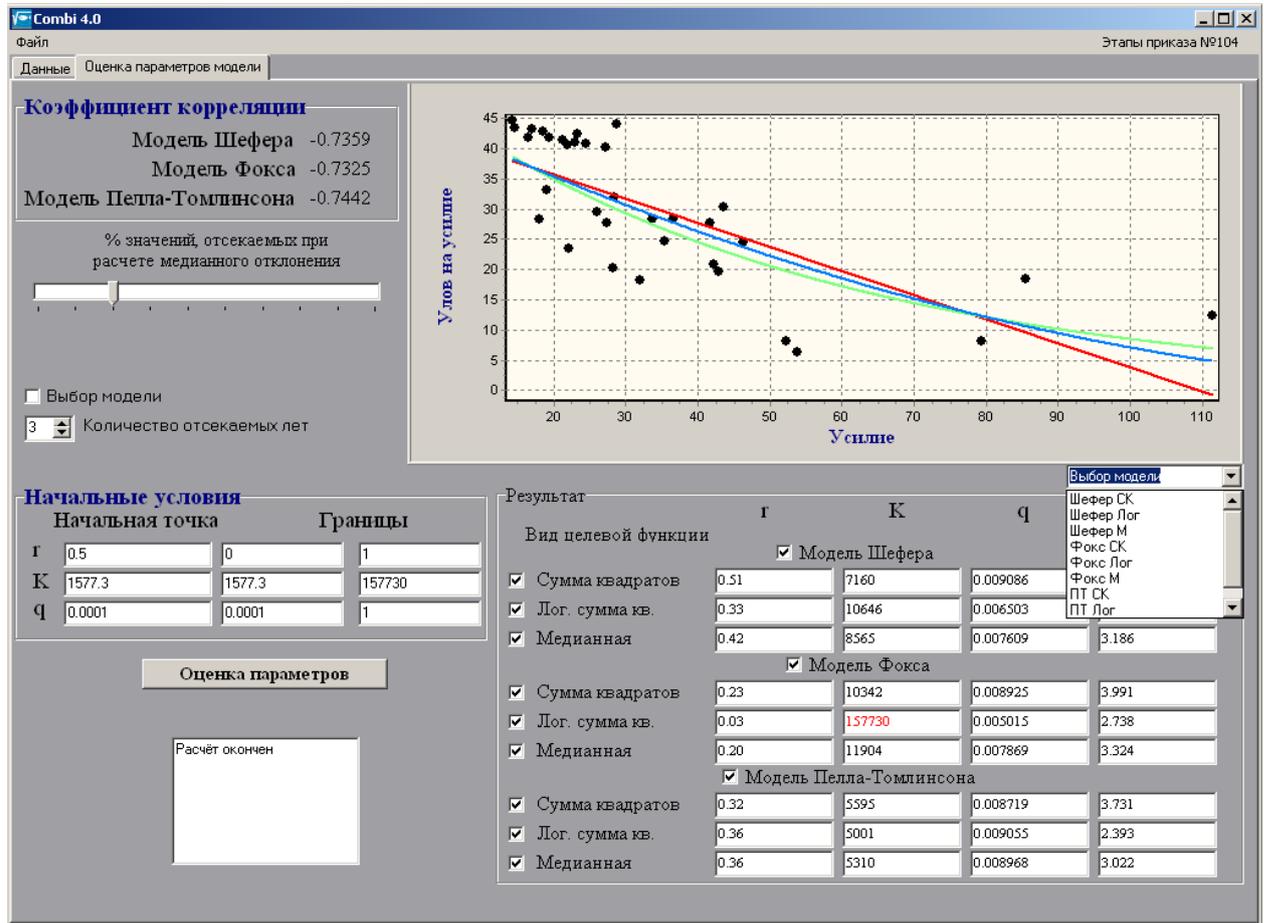


Рис. 5. Внешний вид вкладки **Оценка параметров модели**.

При наличии отрицательной связи между величиной промышленного усилия и уловом на единицу усилия выбор наиболее адекватной модели может быть осуществлен двумя способами: 1) по полному набору данных и 2) по усеченному набору данных. В обоих случаях теоретические значения уловов на усилие (U) восстанавливаются с помощью динамической модели вида:

$$\bar{U}_i = U_{i-2} + r \cdot U_{i-1} + U_{i-2} \cdot G \frac{U_{i-1} + U_{i-2}}{2q} - 2qC_{i-1},$$

где r – параметр популяционного роста, q – коэффициент улавливаемости, U – наблюдаемые значения улова на единицу промышленного усилия, C – общий вылов, $G(\bullet)$ – продукционная функция запаса, описывающая годовой прирост биомассы и зависящая от формулировки модели.

Продукционная функция имеет вид:

$$G(\bullet) = 1 - B/K \quad \text{для модели Шефера,}$$

$$G(\bullet) = \ln(B/K) \quad \text{для модели Фокса,}$$

$$G(\bullet) = 1 - (B/K)^a \quad \text{для модели Пелла-Томлинсона,}$$

где B – биомасса запаса, K – емкость среды (девственная биомасса запаса).

Определение численных значений параметров r , K , q и a производится в ходе исследования целевой функции (L), описывающей степень отклонения модельных значений уловов на единицу усилия от наблюдаемых. Программой предусмотрены три таких функции:

$$\text{сумма квадратов отклонений} \quad L = \varepsilon_i^2,$$

$$\text{логарифмическая сумма квадратов} \quad L = \ln \varepsilon_i^2 + 1^2,$$

$$\text{а также медианное отклонение} \quad L = M_e \varepsilon_i,$$

где ε_i – остатки, рассчитываемые как $\varepsilon_i = U_i - \bar{U}_i$. При расчете отклонений пользователю предоставляется возможность задать ширину медианного окна с помощью ползунка, размещенного в левой верхней части вкладки (рис. 5). В версии Combi 4.0 возможность симметричного отсечения части элементов упорядоченного по возрастанию ряда остатков модели, ранее предусмотренная только для расчета абсолютного медианного отклонения, распространена на все остальные целевые функции. Это позволяет сделать оценку более робастной, минимизировав влияние отдельных аномальных значений остатков на результат оценивания. Таким образом, все функции применяются для анализа наборов данных одинаковой длины и одинакового состава, что делает их сравнение более объективным. По умолчанию отсечение элементов массива не производится (ползунок установлен в позицию 0%), т.е. для оценки параметров модели используется полный ряд данных.

В левой части вкладки расположена панель, где пользователь может определить начальные и граничные условия для поиска минимума целевой функции. По умолчанию начальное значение параметра r устанавливается равным 0.5 из общебиологических соображений, с границами диапазона по-

иска от 0 до 1. Начальное значение параметра K , так же как и нижняя граница диапазона, соответствует максимальному наблюдаемому вылову (C) за исследуемый период; значение верхней границы в 100 раз превышает значение нижней. Начальное значение параметра q , так же как и нижняя граница диапазона, принимается равным 0.0001; верхняя граница установлена равной 1.0. Все эти значения могут изменяться пользователем в режиме редактирования.

В правом нижнем углу вкладки находится панель, позволяющая выбрать вид тестируемой модели, а также вид целевой функции, используемой для определения оптимальных значений параметров. Запуск процедуры параметризации осуществляется нажатием кнопки **Оценка параметров**.

Простота математического формализма, положенного в основу продукционных моделей, к сожалению, не означает, что столь же просты и процедуры оценки их параметров (Hilborn, Walters, 1992). К настоящему времени разработано довольно много способов параметризации продукционных моделей, использующих алгоритмы метода наименьших квадратов, метода максимального правдоподобия, а также байесовский подход (Rankin, Lemos, 2015). В программе Combi реализована упрощенная версия оптимизационного алгоритма типа "пчелиного роя", относящегося к семейству стохастических бионических алгоритмов (Karaboga, 2005). Поиск минимума целевой функции представляет собой диффузионный процесс. Точки пространства параметров, в которых осуществляется измерение целевой функции, выбираются из логнормального распределения, ограниченного на область поиска:

$$\Theta = \Theta^* \exp(x), x \sim N(0, \sigma),$$

где $\Theta^* = (r, K, q)$ – оценка вектора параметров модели.

При условии $L(\Theta) < L(\Theta^*)$ Θ становится новой оценкой вектора параметров, и процедура повторяется. Число испытаний ограничено – в случае, если лучшее значение вектора параметров не было найдено, дисперсия процесса σ понижается, пока не будет достигнута требуемая точность по значениям параметров. Индикатором окончания процесса поиска минимума служит достижение заданной точности по значению целевой функции. Не смот-

ря на то, что вышеописанный алгоритм не является самым быстрым, он крайне прост в реализации, а также обладает рядом существенных преимуществ. В первую очередь он не требует вычисления производных, что позволяет применять его к негладким целевым функциям. Так же как и все стохастические алгоритмы, данный алгоритм обеспечивает нахождение глобального, а не локального минимума, и характерное время сходимости к минимуму слабо зависит от размерности. Результатом работы алгоритма являются наборы параметров, минимизирующие каждую из целевых функций, что позволяет выбрать продукционную функцию и распределение ошибок процесса, наилучшим образом описывающие наблюдения.

1) Выбор модели по полному набору данных (вариант, реализуемый по умолчанию). Оценки параметров моделей и минимальных нормированных значений целевых функций выводятся в окнах редактирования, расположенных на панели в нижнем правом углу вкладки. По окончании расчетов становится доступен выпадающий список **Выбор модели** (рис. 5), в котором следует выбрать вариант параметризации, наилучшим образом описывающий наблюдаемые данные. Наилучшим считается тот вариант, который обеспечивает наименьшее значение целевой функции. **Важно:** не рекомендуется выбирать варианты параметризации, при которых оценки параметров выходят на границы заданных диапазонов значений. В этом случае рекомендуется расширить диапазон поиска.

2) Выбор модели по усеченному набору данных. Опция доступна в том случае, если период наблюдений превышает 15 лет. В данном случае весь набор данных делится на две подвыборки, одна из которых используется для параметризации модели, а другая – для тестирования качества аппроксимации. Параметры моделей, определенные для первой подвыборки, используются для прогнозирования динамики индексов биомассы запаса на заданную перспективу, глубина которой соответствует объему второй подвыборки. Особенности управления промыслом при этом не учитываются, т.е. процедура прогнозирования индексов оперирует известными фиксированными зна-

чениями уловов. Объем тестировочной подвыборки устанавливается опцией **Количество отсекаемых лет** составляет не менее 2 лет и не более 1/3 от продолжительности периода наблюдений (рис. 6). Тестировочная подвыборка используется для сопоставления прогнозных значений улова на усилие с наблюдаемыми. К выбору рекомендуется тот вариант параметризации, который обеспечивает минимальное значение суммарного стандартного отклонения (StdDev) (рис. 6).

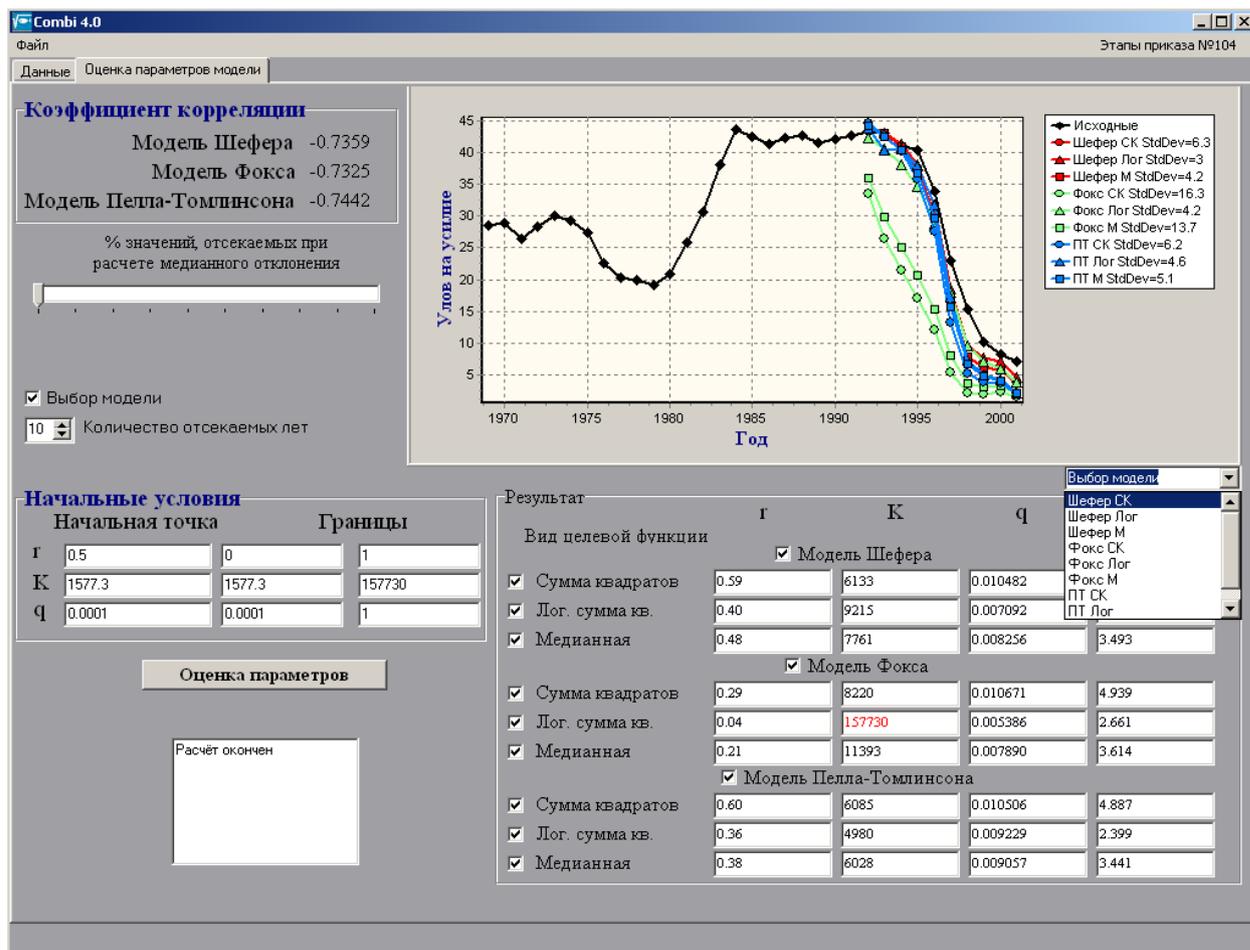


Рис. 6. Внешний вид вкладки **Оценка параметров модели** при включенной опции **Выбор модели**.

В ряде ситуаций рассчитанные значения минимумов целевых функций могут различаться не настолько существенно, чтобы можно было отдать явное предпочтение какому-либо одному из вариантов расчета. В качестве дополнительного средства диагностики в программу включена процедура анализа поверхности ошибок в окрестностях глобального минимума целевой

функции, определенного оптимизационным алгоритмом. Массивы значений целевой функции генерируются программой Combi, обрабатываются с помощью специального скрипта R и возвращаются в программу в виде двумерных контурных изображений, иллюстрирующих поведение выбранной целевой функции в координатах r - K (где r – параметр популяционного роста, K – емкость среды) либо в координатах MSY - F_{MSY} , имеющих более конкретный смысл в терминах управления промыслом (рис. 7). Переход из одной системы координат в другую осуществляется с учетом связанности параметров соотношениями

$$r = F_{MSY} (\gamma + 1) / \gamma \quad \text{и}$$

$$K = (MSY / F_{MSY}) (\gamma + 1)^{1/\gamma}$$

где γ – коэффициент формы обобщенной продукционной модели Пелла-Томлинсона.

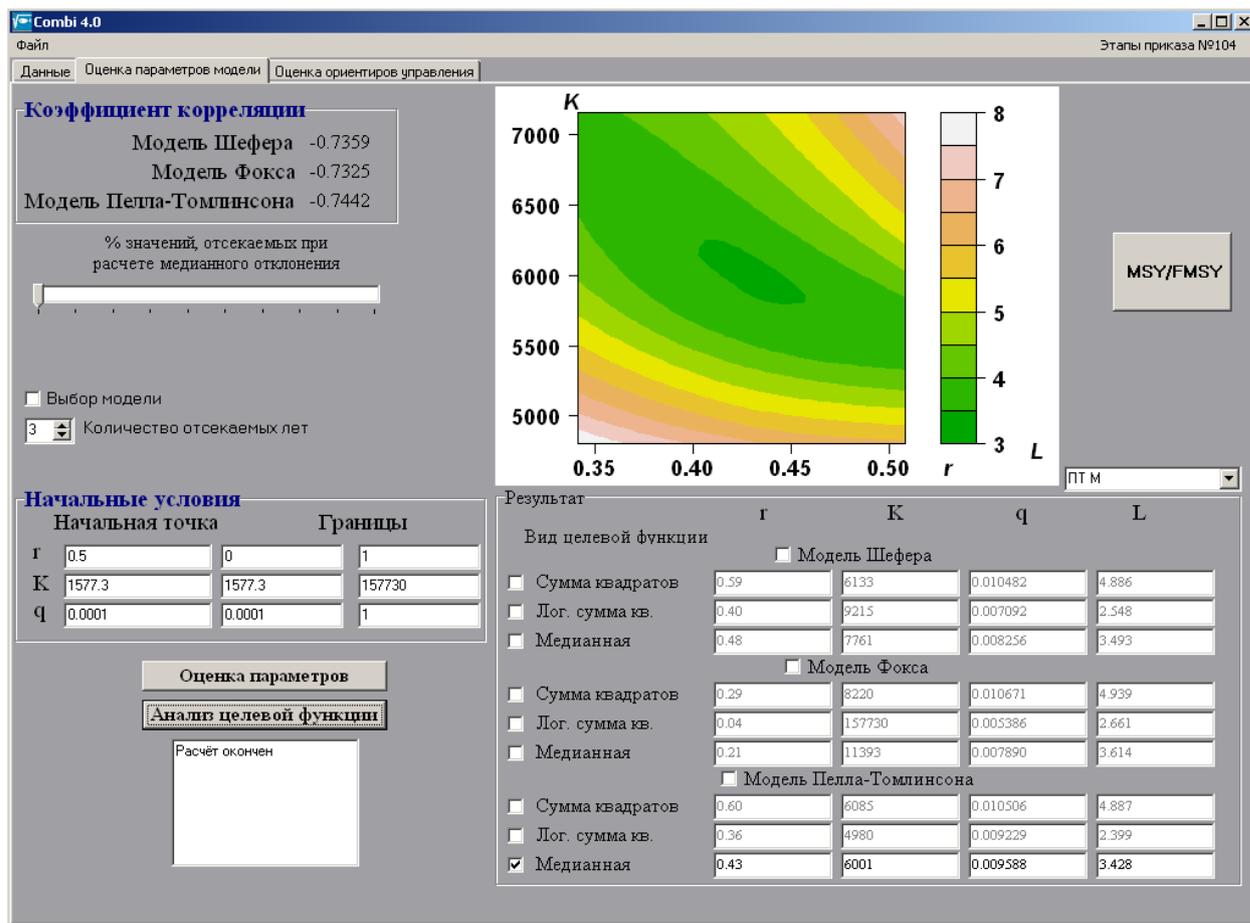


Рис. 7. Вкладка **Оценка параметров модели** при включенной опции **Анализ целевой функции**.

Отображаемые поверхности ошибок дают возможность посредством визуального сопоставления оценить степень выраженности найденных минимумов целевых функций, от которой, в свою очередь, зависит степень доверия к расчетным оценкам параметров моделей. **Важно:** опция **Анализ целевой функции** доступна при наличии установленного пакета R на компьютере пользователя.

Следует отметить, что оценки параметров, полученные при реализации оптимизационной процедуры, являются "наилучшими" лишь в статистическом смысле, т.е. обеспечивают наиболее близкое соответствие теоретических данных эмпирическим. Поскольку эмпирические данные обычно зашумлены (иногда сильно), оценки параметров могут оказаться смещенными. В этой связи рекомендуется обращать внимание на то, чтобы они укладывались в биологически правдоподобные диапазоны. Известно, что характеристики жизненного цикла рыб взаимосвязаны (напр., Beverton, Holt, 1959; Charnov, 1993). Это дает возможность убедиться в реалистичности оценок параметров модели на основе их сопоставления с другими популяционными показателями. В наибольшей степени это касается скорости популяционного роста (r), непосредственные измерения которой сопряжены с существенными методическими проблемами. Ниже приведена таблица, составленная Американским рыбохозяйственным обществом (American Fisheries Society) и ранжирующая популяции рыб по признаку продуктивности и, соответственно, восстановительной способности. В таблице коэффициент популяционного роста соотнесен с некоторыми другими характеристиками жизненного цикла. Соотношение биологических показателей в популяциях рыб различной продуктивности (Musick, 1999).

Продуктивность запаса	Высокая	Средняя	Низкая	Очень низкая
Коэффициент популяционного роста (r), год ⁻¹	> 0.5	0.16–0.50	0.05–0.15	< 0.05
Скорость линейного роста (k , параметр ур-ния Бергаланффи), год ⁻¹	> 0.3	0.16–0.30	0.05–0.15	< 0.05
Плодовитость, год ⁻¹	> 10 000	100–1000	10–100	< 10
Возраст полового созревания, лет	< 1	2–4	5–10	> 10
Продолжительность жизни, лет	1–3	4–10	11–30	> 30

3.3. Вкладка **Оценка ориентиров управления.**

Предназначена для определения целевых и граничных ориентиров управления промыслом исходя из допущения о равновесном состоянии запаса. В основу определения ориентиров управления положена концепция MSY и принципы предосторожного подхода. По нажатии кнопки **Построить график** (рис. 8) в центре вкладки отрисовывается зависимость прибавочной продукции от биомассы запаса, соответствующая выбранной продукционной модели. Ордината максимума кривой определяет значение максимального уравнившегося вылова (MSY). Абсцисса максимума соответствует величине биомассы запаса, обеспечивающей максимальный темп продуцирования и, как следствие, максимальную величину потенциального вылова (B_{MSY}). Применительно к модели Шефера величина B_{MSY} рассчитывается как $B_{MSY} = K/2$, к модели Фокса – как $B_{MSY} = K/e$, к модели Пелла-Томлинсона – как $B_{MSY} = K/a^{1/(a-1)}$, где a – показатель степени в рассматриваемой модели. Значение промысловой смертности, обеспечивающей максимальную величину уравнившегося вылова, определяется как $F_{MSY} = MSY / B_{MSY}$, соответствующее значение промыслового усилия – как $E_{MSY} = MSY / (q \cdot B_{MSY})$, в силу принятого в используемых моделях допущения о связи между этими показателями: $F = q \cdot E$.

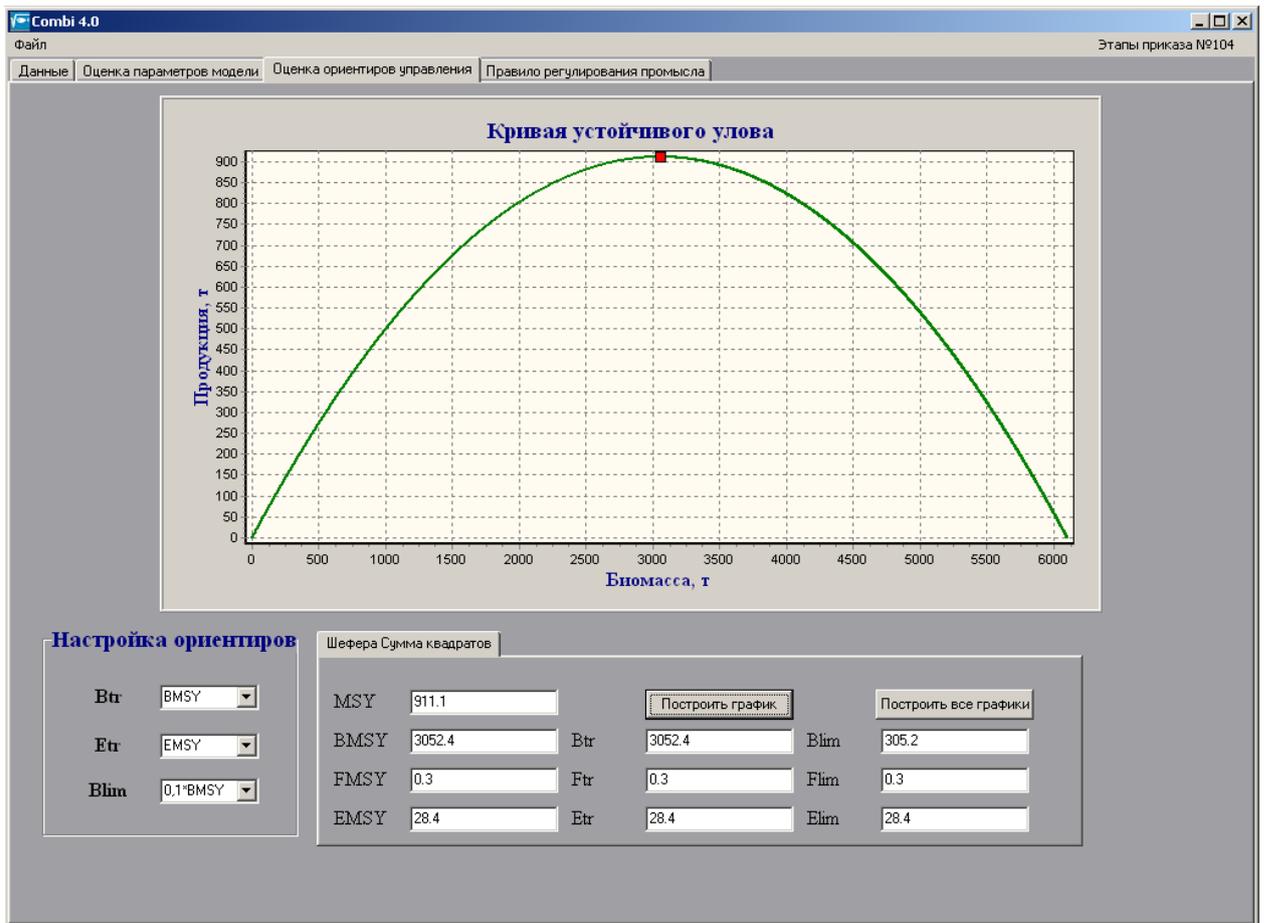


Рис. 8. Внешний вид вкладки **Оценка ориентиров управления**.

По умолчанию целевой ориентир по биомассе (B_{tr}) устанавливается на уровне B_{MSY} , граничный ориентир (B_{lim}) – на уровне $0.1 \cdot B_{MSY}$. Целевые и граничные ориентиры по промысловому усилию (E_{tr} и E_{lim}) и, соответственно, по промысловой смертности (F_{tr} и F_{lim}) устанавливаются на уровне E_{MSY} и F_{MSY} .

Панель **Настройка ориентиров**, расположенная в нижнем левом углу вкладки (рис. 8), предоставляет пользователю возможность корректировки принятых по умолчанию ориентиров с учетом особенностей анализируемой системы «запас–промысел». В частности, для целевого ориентира по биомассе определены следующие опции: $B_{tr} = B_{MSY}$; $B_{tr} = B_{0.1}$ (рассчитывается как $B_{0.1} = 0.55 \cdot K$) и $B_{tr} = B_{MSY} + \sigma_B \cdot t$, где σ_B – стандартная ошибка оценки биомассы запаса, t – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $P = 0.90$. Аналогичные опции используются для целевого ориентира по промысловому усилию E_{tr} . В силу очевидной связи между показателями E и F

изменение целевого ориентира по промысловому усилию автоматически приводит к перерасчету ориентира по промысловой смертности F_{tr} . Граничный ориентир по биомассе может быть определен как некоторая заданная доля величины B_{MSY} .

3.4. Вкладка **Правило регулирования промысла**.

Предназначена для выбора и «настройки» правила регулирования промысла (ПРП), используемого в дальнейшем для прогнозирования состояния запаса и величины ОДУ. Пользователю предоставляется возможность выбора между двумя категориями ПРП, соответствующими различным подходам к регулированию рыболовства: консервативному и адаптивному (рис. 9). Консервативные ПРП являются незональными и оперируют одним ориентиром управления $F_{tr} = \text{const}$ во всем диапазоне возможных изменений биомассы запаса. Адаптивные ПРП подразумевают более сложную функциональную связь между биомассой запаса и управляемыми параметрами системы "запас–промысел", вытекающую, в частности, из принципов предосторожности в управлении промыслом.

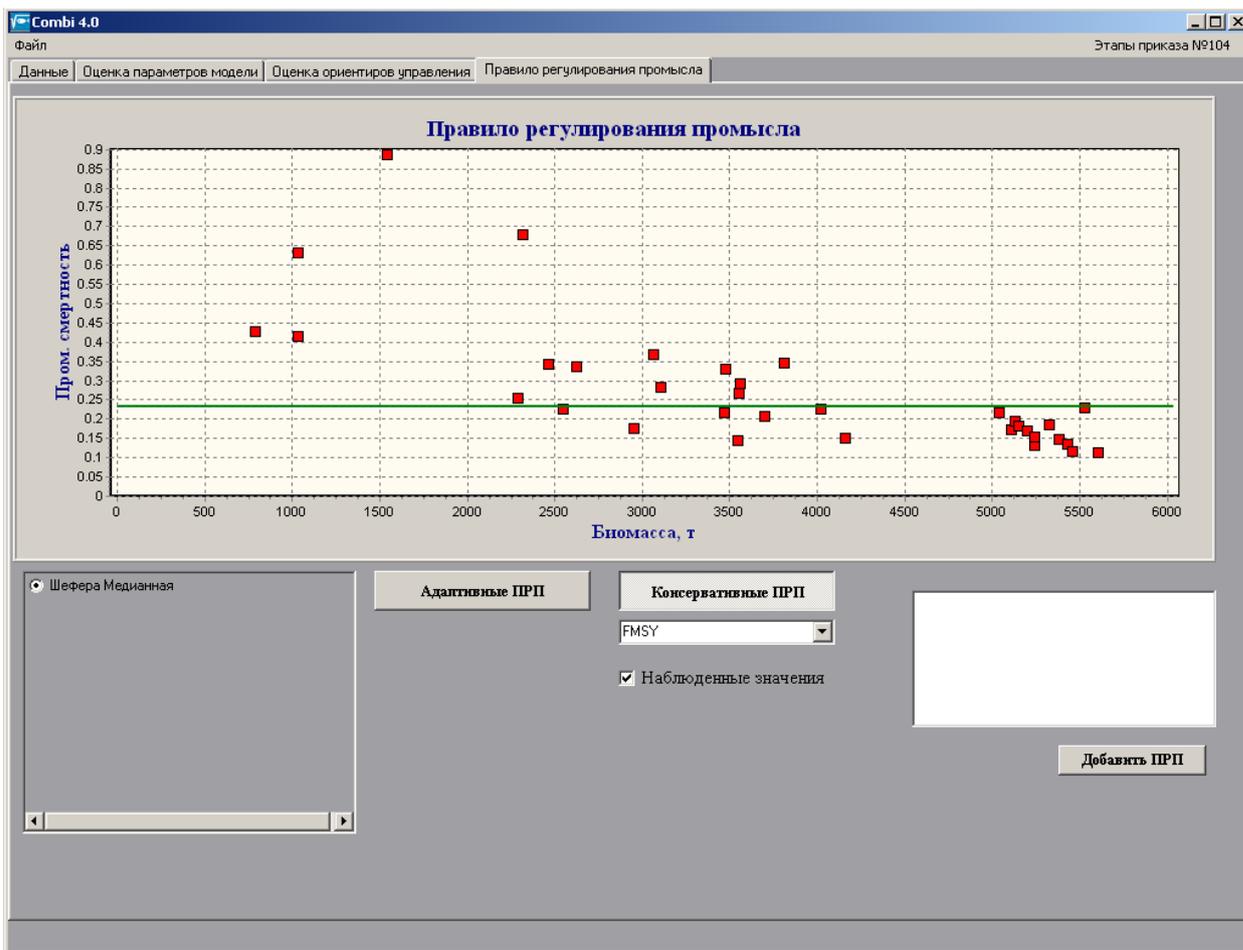


Рис. 9. Внешний вид вкладки **Правило регулирования промысла**. Включена опция **Консервативные ПРП**.

Адаптивные ПРП обращаются к двум функциям, задающим зависимость коэффициента промысловой смертности от биомассы запаса: кусочно-линейной и логистической (рис. 10).

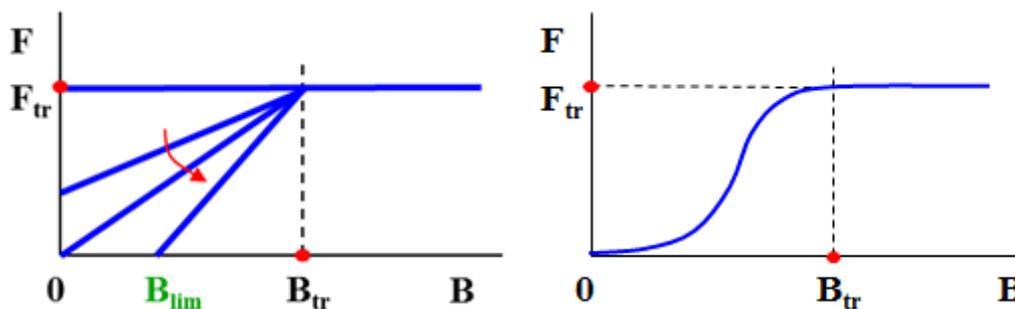


Рис. 10. Общий вид функций, используемых при обосновании ПРП: кусочно-линейная (слева) и логистическая (справа).

По умолчанию используется кусочно-линейная функция (рис. 11), параметры которой устанавливаются в соответствии с ориентирами управле-

ния, определенными пользователем на предыдущей вкладке. Кусочно-линейное ПРП задается следующим образом:

на отрезке $B < \alpha B_{tr}$: $F_{rec} = 0,$

на отрезке $0 \leq B \leq B_{tr}$ при $-1 \leq \alpha < 0$: $F_{rec} = -\alpha \cdot F_{tr} + \frac{F_{tr} (1+\alpha)}{B_{tr}} \cdot B,$

на отрезке $\alpha B_{tr} \leq B \leq B_{tr}$ при $0 \leq \alpha < 1$: $F_{rec} = \frac{F_{tr}}{B_{tr}(1-\alpha)} \cdot B - \alpha B_{tr},$

на отрезке $B > B_{tr}$: $F_{rec} = F_{tr},$

где F_{rec} и F_{tr} – рекомендуемое и целевое значение промысловой смертности; B и B_{tr} – текущее и целевое значение биомассы промыслового запаса; α – коэффициент формы. Коэффициент α может быть изменен в диапазоне от -1 до 1 , что, в частности, позволяет избавиться от необходимости задания граничного ориентира по биомассе B_{lim} . В предельном случае, когда $\alpha = -1$, результирующее ПРП оказывается незональным, т.е. рекомендованное значение промысловой смертности (F_{rec}) остается постоянным и не зависящим от состояния запаса.

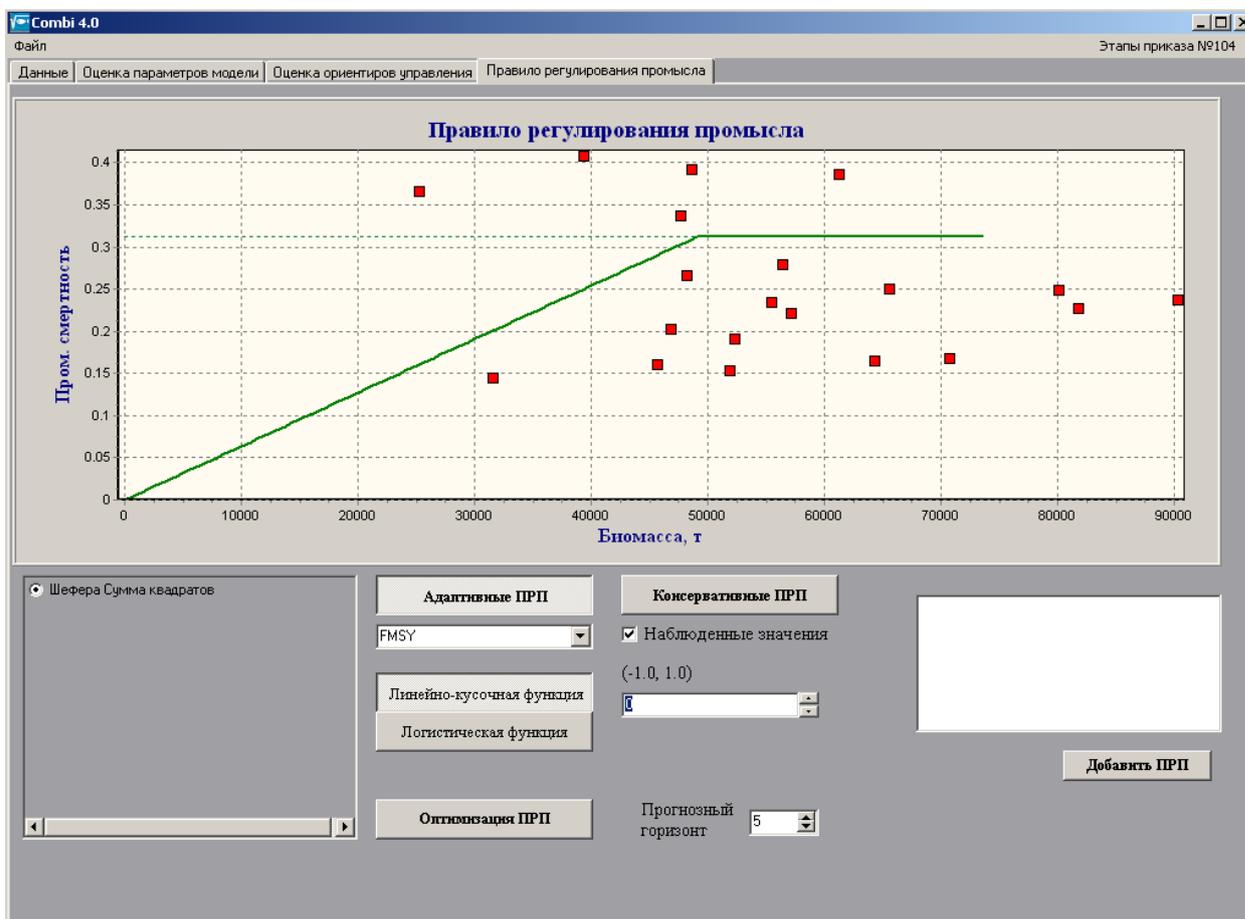


Рис. 11. Внешний вид вкладки **Правило регулирования промысла**. Включена опция **Линейно-кусочная функция**.

Альтернативным выбором является нелинейное (логистическое) правило регулирования промысла (рис. 12). Главное его достоинство заключается в том, что, будучи двухзональным, оно не нуждается в граничном ориентире по биомассе, но в то же время обеспечивает повышенную степень защищенности запаса в области низких значений биомассы. Конкретный вид функции определяется двумя параметрами: коэффициентом формы (α) и положением точки перегиба (β , где параметр β выражен в долях от целевого ориентира по биомассе B_{tr}). Логистическое ПРП задается следующим образом:

$$\text{на отрезке } 0 \leq B \leq \beta \cdot B_{tr}: \quad F_{rec} = \beta \cdot F_{tr} \cdot \frac{B}{\beta \cdot B_{tr}}^{\alpha},$$

$$\text{на отрезке } \beta \cdot B_{tr} < B \leq B_{tr}: \quad F_{rec} = F_{tr} \cdot 1 - (1 - \beta) \cdot \frac{B_{tr} - B}{(1 - \beta) \cdot B_{tr}}^{\alpha}$$

$$\text{на отрезке } B > B_{tr}: \quad F_{rec} = F_{tr},$$

где F_{rec} – рекомендуемый уровень промысловой смертности. Коэффициент α принимает значения $\alpha \geq 1$ и не ограничен сверху, коэффициент β меняется в диапазоне $0 \leq \beta \leq 1$. Значения коэффициентов могут настраиваться пользователем в целях выбора наиболее результативной стратегии управления промыслом.

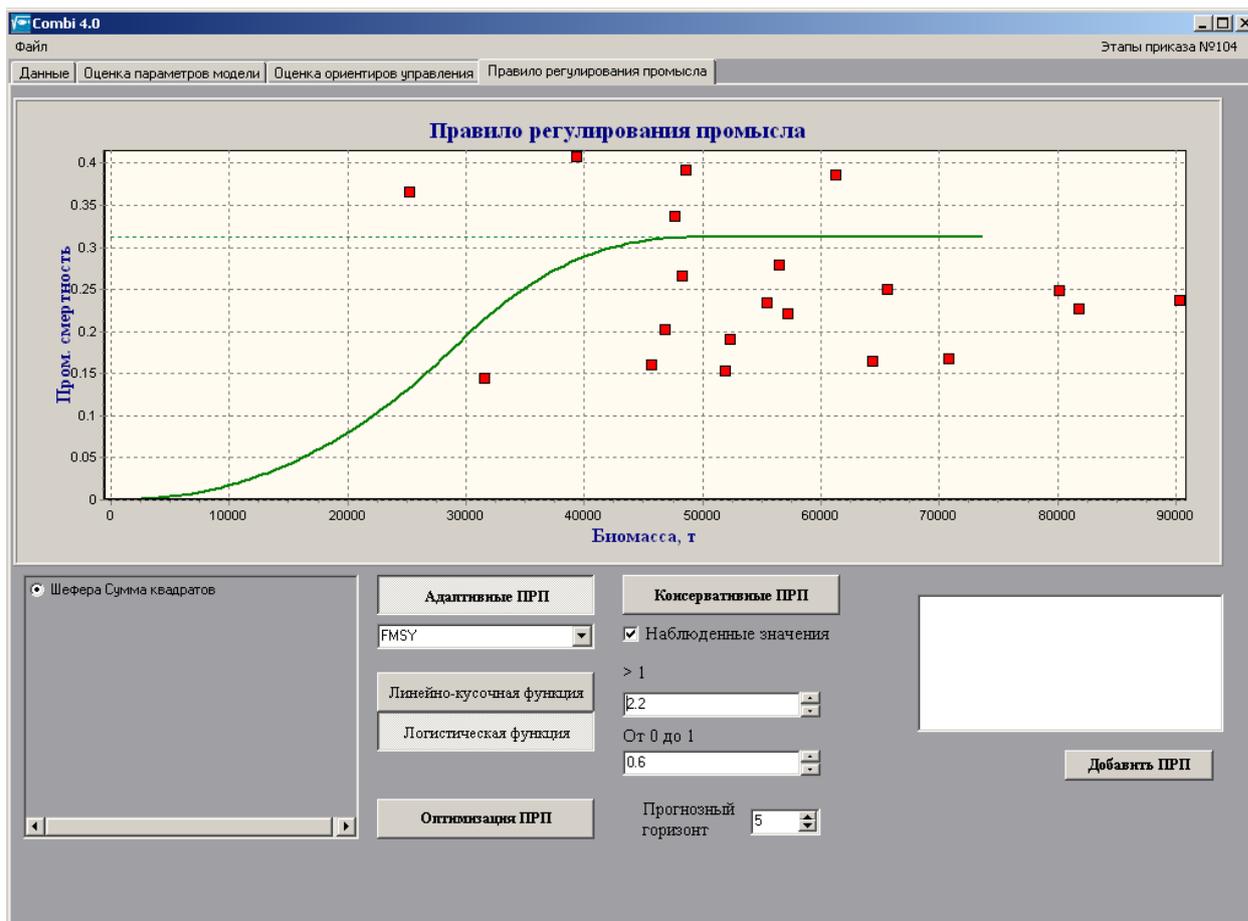


Рис. 12. Внешний вид вкладки **Правило регулирования промысла**. Включена опция **Логистическая функция**.

Дополнительно пользователю предоставляется возможность для корректировки целевого ориентира по промысловой смертности (выпадающий список в центральной части вкладки) (рис. 11, 12).

В предыдущей версии программы набор опций ПРП, подлежащих тестированию на предмет эффективности управления, формировался пользователем «вручную», за счет манипулирования значениями параметров функций, определяющих его форму. В версии 4.0 эта возможность сохраняется, однако дополнена предварительным анализом эффективности ПРП во всем возможном диапазоне изменений параметров (реализуется нажатием кнопки **Оптимизация ПРП**). В качестве показателей эффективности управления используются следующие критерии:

1. средний улов на прогнозном отрезке времени;
2. средняя биомасса промыслового запаса на прогнозном горизонте;
3. средняя вариабельность уловов на прогнозном горизонте;

4. риск снижения биомассы ниже средней на ретроспективе.

Процедура оптимизации применима к обеим функциям, используемым для задания формы ПРП: кусочно-линейной и логистической. Глубина прогнозного горизонта по умолчанию установлена равной 5 годам, но может быть изменена пользователем (в диапазоне от 1 до 20 лет). **Важно:** для двухпараметрической логистической функции к анализу привлекаются средства среды программирования R, опция доступна при наличии установленного пакета R на компьютере пользователя.

Процедура отыскивает такие наборы параметров используемых функций, при которых какой-либо из коэффициентов эффективности оптимален, например максимален среднемноголетний улов

$$(\alpha, \beta)_C = \arg \max E \frac{1}{\tau} \sum_{t=T}^{T+\tau} C_t$$

или минимальна межгодовая вариабельность улова

$$(\alpha, \beta)_V = \arg \min E \frac{1}{\tau} \sum_{t=T}^{T+\tau} \frac{\delta C_t}{C_t} .$$

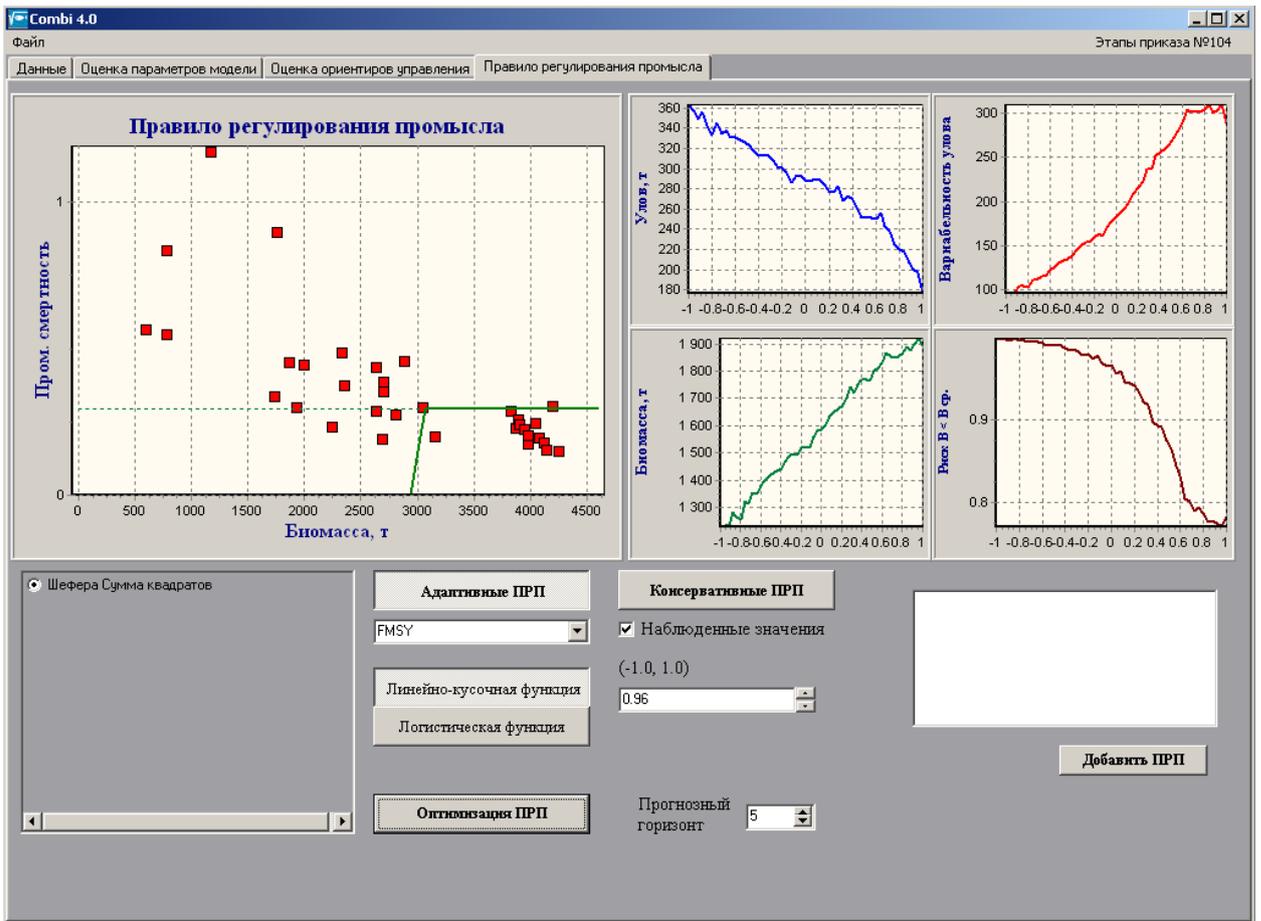


Рис. 13. Внешний вид вкладки **Правило регулирования промысла**. Включена опция **Оптимизация ПРП** для линейно-кусочной функции.

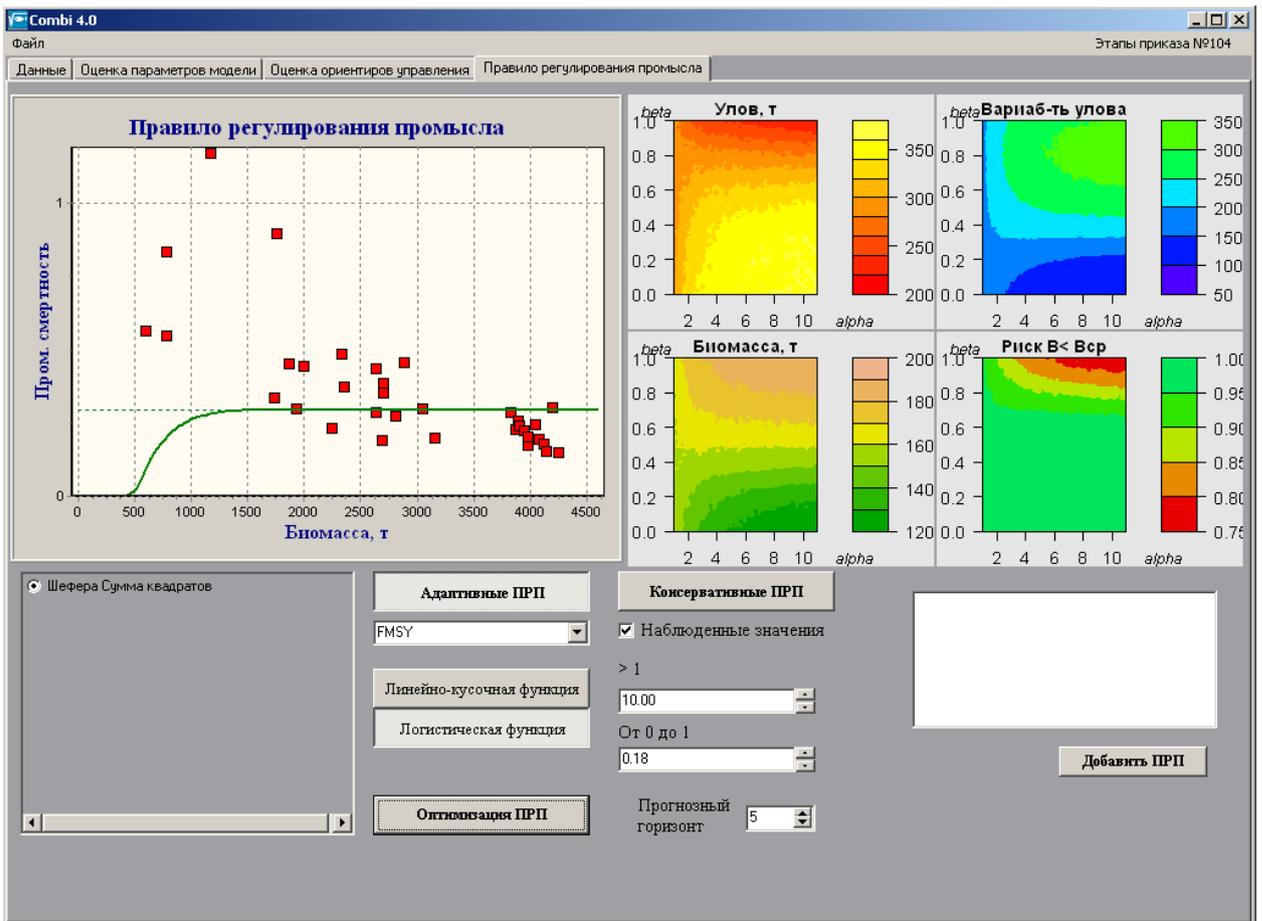


Рис. 14. Внешний вид вкладки **Правило регулирования промысла**. Включена опция **Оптимизация ПРП** для логистической функции.

Каждый из определенных пользователем вариантов правила регулирования промысла заносится в список ПРП, подлежащих дальнейшему тестированию на эффективность, нажатием кнопки **Добавить ПРП**, расположенной в нижнем правом углу вкладки. Исключение тех или иных вариантов ПРП из сформированного списка производится нажатием кнопки **Удалить ПРП**.

3.5. Вкладка **Коэффициенты эффективности**.

При открытии, на вкладку подается список ПРП, определенных пользователем, и формируется таблица решений, в которую в дальнейшем заносятся оценки показателей эффективности управления. Запуск процедуры расчета этих показателей и заполнения таблицы решений осуществляется нажатием кнопки **Оценка коэффициентов эффективности** (рис. 15).

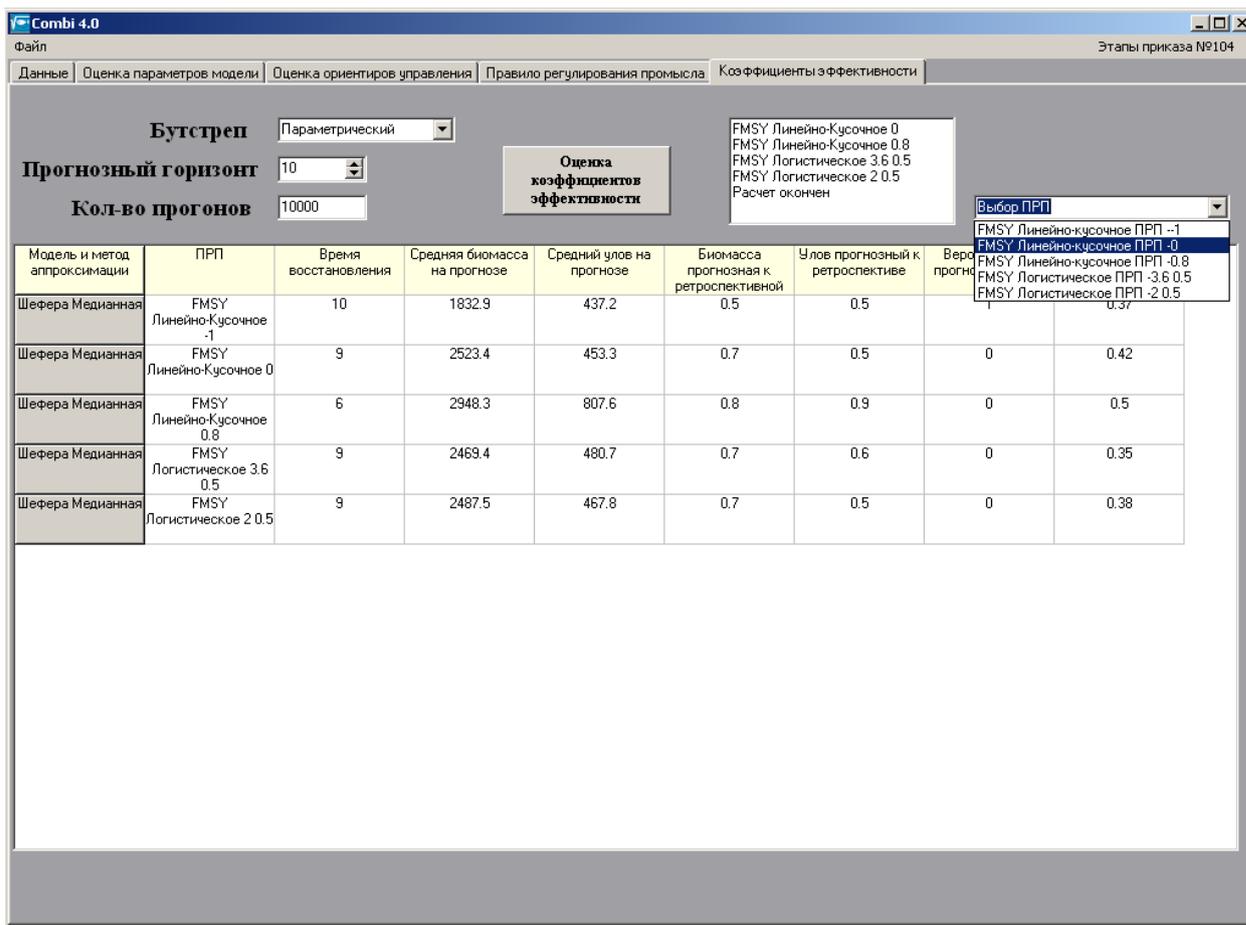


Рис. 15. Внешний вид вкладки **Коэффициенты эффективности**.

Оценка эффективности управления производится по результатам прогнозирования динамики запаса на заданную перспективу. По умолчанию прогнозный горизонт устанавливается равным 5 годам, но может быть изменен пользователем. Прогноз строится для всех схем управления, фигурирующих в списке, в соответствии с заданными ориентирами управления и опциями ПРП. Необходимая для анализа статистика прогнозных оценок набирается за счет использования бутстреп-процедуры. По умолчанию применяется параметрическая бутстреп-процедура, оперирующая вероятностными распределениями остатков (отклонений теоретических значений уловов на единицу промыслового усилия, предсказываемых выбранной продукционной моделью, от зарегистрированных значений, полученных в ходе наблюдений за состоянием анализируемой системы «запас–промысел»). При расчете остатков используется алгоритм, описанный выше, в разделе 3.2. Альтернативной опцией является применение непараметрической бутстреп-

процедуры, в рамках которой осуществляется перераспределение остатков без анализа их статистического распределения. Общее число формируемых бутстреп-выборок определяется количеством реализаций бутстреп-процедуры (значение, заданное по умолчанию, составляет 10 000).

В качестве показателей эффективности ПРП, определенных пользователем, используются следующие характеристики:

- время восстановления: определяется как число лет, потребных для восстановления биомассы запаса до уровня B_{tr} (Примечание: если на прогнозном горизонте запас не восстанавливается до уровня B_{tr} , программа выводит в итоговую таблицу вместо истинной оценки времени восстановления заданную заблаговременность прогноза. В этом случае рекомендуется увеличить прогнозный период. Оценку времени восстановления можно считать корректной в случае, если она не меняется при дальнейшем увеличении горизонта прогноза);
- средняя биомасса на прогнозе: определяется как прогнозируемое значение биомассы запаса, осредненное по числу бутстреп-выборок и глубине прогнозного горизонта;
- средний улов на прогнозе: определяется как прогнозируемое значение улова, осредненное по числу бутстреп-выборок и глубине прогнозного горизонта;
- биомасса прогнозная к ретроспективной: определяется как отношение средней прогнозируемой биомассы запаса к средней биомассе за период наблюдений, восстановленной с помощью выбранной модели;
- улов прогнозный к ретроспективе: определяется как отношение среднего прогнозируемого улова к среднему улову, полученному за период наблюдений;
- вероятность B прогнозного $< B_{lim}$: определяется как доля бутстреп-выборок, в которых прогнозируемая биомасса запаса оказывается

ниже граничного ориентира, от суммарного числа выборок, полученных на прогнозном горизонте;

- вероятность C прогнозный $< C_{min}$: определяется как доля бутстреп-выборок, в которых прогнозируемый вылов оказывается ниже минимального зарегистрированного вылова, от суммарного числа выборок, полученных на прогнозном горизонте.

По окончании расчетов становится доступным выпадающий список **Выбор ПРП**, расположенный в правой верхней части вкладки (рис. 15), из которого следует выбрать одну из опций, в наибольшей степени соответствующих текущим целям управления и обеспечивающих максимальную эффективность принимаемой схемы регулирования промысла.

3.6. Вкладка **Обоснование расчетного значения ОДУ**.

Содержит две вспомогательные вкладки: **Прогноз биомассы и уловов** и **Результаты**.

На вспомогательной вкладке **Прогноз биомассы и уловов** по нажатию кнопки **Построить график** отрисовывается динамика анализируемой системы «запас–промысел» (рис. 16). Отображаемая на диаграмме динамика представлена двумя сегментами: изменениями фактических уловов и воспроизводимой моделью биомассы запаса в период наблюдений и прогнозными оценками вылова (= ОДУ) и биомассы запаса на заданную перспективу. Глубина прогнозного горизонта по умолчанию равна 5 годам, но может быть установлена пользователем в соответствующем окне редактирования.

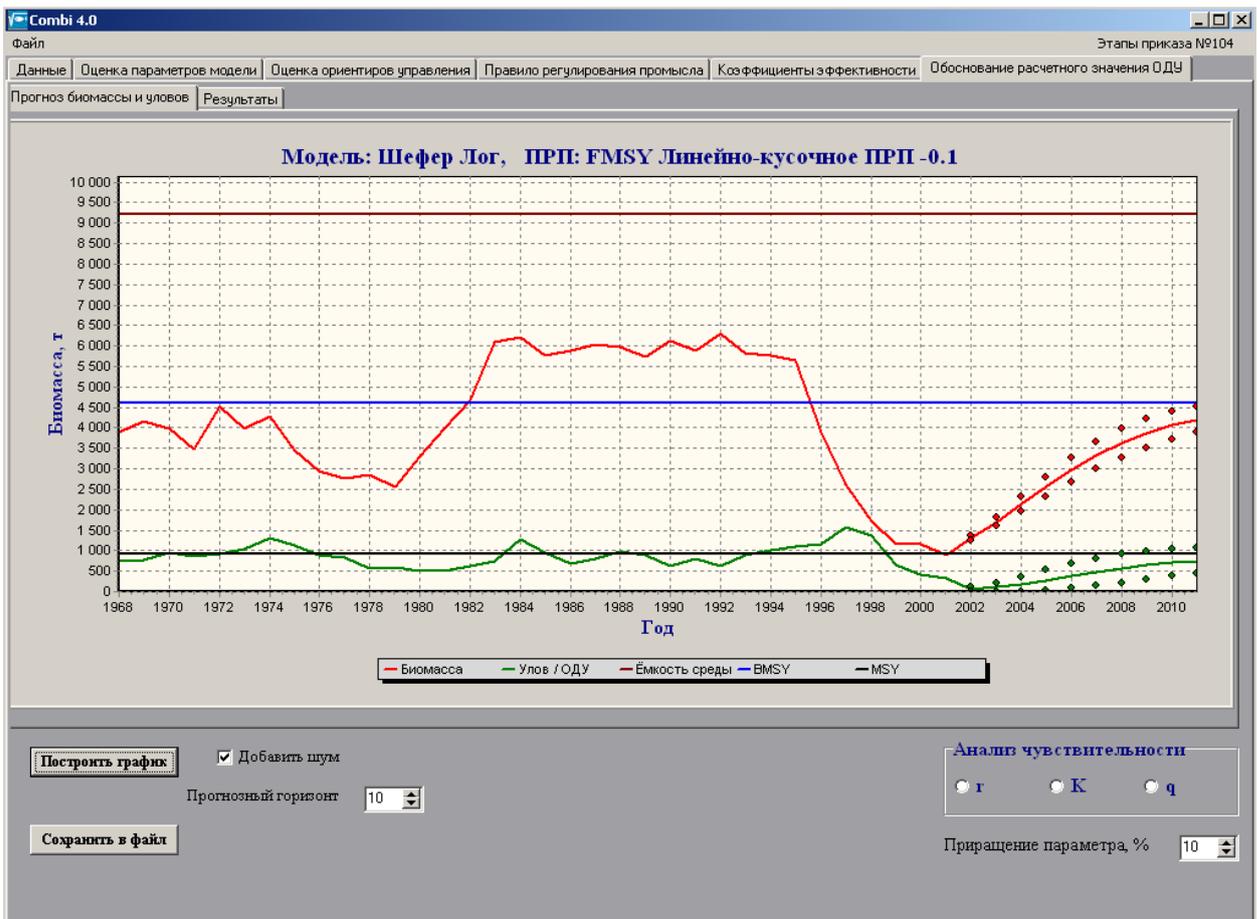


Рис. 16. Внешний вид вкладки **Обоснование расчетного значения ОДУ**. Активизирована вспомогательная вкладка **Прогноз биомассы и уловов**.

При включенной опции **Добавить шум** (рис. 16) прогнозирование осуществляется в предположении о случайном варьировании годового прироста биомассы запаса на прогнозном горизонте. В этом случае к расчетному значению продукционной функции добавляется случайная переменная, распределенная по нормальному закону. Параметры распределения (среднее значение и дисперсия) определяются по результатам анализа отклонений теоретических значений уловов на единицу промыслового усилия от зарегистрированных в период наблюдений.

При «зашумлении» динамики программа, помимо точечных прогнозных значений ОДУ, генерирует интервальные оценки (рис. 16). Границы интервалов устанавливаются таким образом, чтобы прогнозное значение ОДУ попадало внутрь интервала с 90%-ной вероятностью.

Дополнительная опция, включенная в версию программы COMBI 4.0, представлена анализом чувствительности модели (становится доступна после

нажатия кнопки **Построить график**). Анализ чувствительности позволяет составить представление о влиянии значений различных параметров модели (r , K и q) на прогнозные оценки биомассы запаса и улова. В области малых приращений параметров чувствительность модели может интерпретироваться как частная производная результирующей переменной по параметрам (Miller, 1974; Страшкраба, Гнаук, 1989). В расчетной процедуре параметрам задается приращение в диапазоне ± 5 – 50% от исходных значений (по умолчанию $\pm 10\%$). Результаты отображаются на основной диаграмме вкладки, на временном интервале, относящемся к прогнозному периоду. Очевидно, что параметры, варьирование которых приводит к наибольшему разбросу результирующих оценок, требуют особого внимания при параметризации модели.

Вспомогательная вкладка **Результаты** предназначена для цифрового вывода оценок биомассы запаса и уловов, полученных в ходе расчетов (рис. 17).

The screenshot shows the 'Results' tab in the Combi 4.0 software. The main window displays a table with three columns: 'ГОД' (Year), 'БИОМАССА ЗАПАСА' (Biomass Stock), and 'УЛОВЫ' (Catches). The table contains data for the years 1968 to 1995. Below the table, there are control buttons: 'Построить график' (Build graph), 'Добавить шум' (Add noise), 'Сохранить в файл' (Save to file), and 'Анализ чувствительности' (Sensitivity analysis). The sensitivity analysis section has radio buttons for parameters r , K , and q , and a dropdown for 'Приращение параметра, %' (Parameter increment, %) set to 10.

ГОД	БИОМАССА ЗАПАСА	УЛОВЫ
1968	3890.21	755
1969	4152.48	767
1970	3990.32	955
1971	3482.72	874
1972	4512.03	910
1973	3990.32	1035
1974	4272.33	1320
1975	3440.42	1129
1976	2946.92	882
1977	2763.62	841
1978	2862.32	574
1979	2566.22	582
1980	3313.52	520
1981	3976.22	509
1982	4667.13	628
1983	6091.24	732
1984	6204.04	1265
1985	5781.04	942
1986	5879.74	689
1987	6034.84	790
1988	5978.44	986.5
1989	5731.69	888.9
1990	6127.9	631.7
1991	5879.74	805
1992	6288.64	635
1993	5837.44	880.1
1994	5752.84	997.6
1995	5654.13	1089.7

Рис. 17. Внешний вид вкладки **Обоснование расчетного значения ОДУ**. Активизирована вспомогательная вкладка **Результаты**.

В нижнем левом углу вкладки расположена кнопка **Сохранить в файл** (рис. 16, 17) по нажатию которой вызывается диалоговое окно, где пользователю предоставляется возможность задать имя файла для записи результатов расчетов. При выполнении необходимых действий программа формирует два файла с одинаковым именем, но с разными расширениями. В файл с расширением *.jpeg записывается результирующая диаграмма, в файл с расширением *.txt – основные характеристики используемой в анализе модели, применяемого правила регулирования промысла и результаты расчетов (рис. 18).

VOXM результаты — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

Вид
Запас
Период наблюдения 1968 - 2001
Файл входных данных N:\Сомби\Рабочая версия Сентябрь (19-09-15)\Раф

Производственная модель Шефера, целевая функция: логарифмическая

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

г 0,39
К 9409
q 0,007033
Значение целевой функции 2,548

Управление: линейно-кусочное ПРП -1

ОРИЕНТИРЫ УПРАВЛЕНИЯ

MSY 908,8

BMSY 4704,7
Btg 4704,7
Blim 470,5

EMSY 27,47
Etg 27,47

FMSY 0,19
Ftg 0,19

Количество лет прогноза 10

ГОД	БИОМАССА ЗАПАСА	УЛОВЫ
1968	3923,16	755
1969	4187,64	767
1970	4024,12	955
1971	3512,21	874
1972	4550,24	910
1973	4024,12	1035
1974	4308,51	1320
1975	3469,56	1129
1976	2971,87	882
1977	2787,02	841
1978	2886,56	574
1979	2587,95	582
1980	3341,58	520
1981	4009,9	509
1982	4706,65	628
1983	6142,82	732
1984	6256,58	1265
1985	5829,99	942
1986	5929,53	689
1987	6085,94	790
1988	6029,06	986,5
1989	5780,22	888,9
1990	6179,79	631,7

Рис. 18. Образец файла записи результатов реализации программы COMBI 3.0.

4. Завершение работы.

В варианте программы COMBI 4.0 исправлен ряд существовавших неточностей, а также введены новые диагностические процедуры. Сообщения об ошибках, возникающих в ходе ее применения, а также Ваши пожелания о дальнейшем совершенствовании содержания и интерфейса программы просьба направлять в адрес лаборатории системного анализа водных биологических ресурсов, ВНИРО.

Литература

Страшкраба М., Гнаук А. 1989. Пресноводные экосистемы: Математическое моделирование. М.: Мир. 373 с.

Babayán V.K., Kizner Z. 1988. Dynamic models for TAC assessment: Logic, potentialities, development // ICSEAF, Colln. Sci. Pap. Int. Commn. SE Atl. Fish. V. 15(1). P. 69–83.

Beverton R.J.H., Holt S.J. 1959. A review of the lifespans and mortality rates of fish in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics // Ciba Foundation Colloquia on Ageing. V. 5. P. 142–180.

Butterworth D.S., Andrew P.A. 1984. Dynamic catch-effort model for the hake stock in ICSEAF Divisions 1.3-2.2 // Colln. Sci. Pap. Intern. Commn. SE Atl. Fish. Pap. V. 11(1). P. 29–58.

Charnov E.L. 1993. Life History Invariants: Some Explorations of Symmetry in Evolutionary Ecology. Oxford: Oxford Univ. Press. 182 p.

Corsi F. 2000. Geographical Information Systems and Surplus Production Models: a new model for spatial assessment of demersal resources / Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries // Eds M. Taconet, A. Bensch. Informes y Estudios COPEMED. № 4.

Fox W.W. 1970. An exponential yield model for optimizing exploited fish populations // Trans. Am. Fish. Soc. V. 99. P. 80–88.

Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies // *Phil. Trans. Royal Soc.* V. 115. P. 515–585.

Graham M. 1935. Modern theory of exploiting a fishery, and application to North Sea trawling // *J. Cons. Intern. Explor. Mer.* V. 10(3). P. 264–274.

Hilborn R. 1979. Comparison of fisheries control systems that utilize catch and effort data // *J. Fish. Res. Board Can.* V. 33. P. 1477–1489.

Hilborn R., Walters C.J. 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty.* N.-Y.; L.: Chapman and Hall. 570 p.

ICES. 2012. Report on the Classification of Stock Assessment Methods developed by SISAM. ICES CM 2012/ACOM/SCICOM:01. 15 p.

Karaboga D.D. 2005. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization // Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

Laloë F. 1995. Should surplus production models be fishery description tools rather than biological models? // *Aquat. Living Resour.* V. 8. P. 1–16.

Miller D.R. 1974. Sensitivity analysis and validation of simulation models // *J. Theor. Biol.* V. 48. P. 345–360.

Musick J.A. 1999. Criteria to define extinction risk in marine fishes // *Fisheries.* V. 24(12). P. 6–14.

Pella J.J., Tomlinson P.K. 1969. A generalized stock production model // *Bull. Intern. Amer. Trop. Tuna Comm.* V. 13(3). P. 419–496.

Rankin P.S., Lemos R.T. 2015. An alternative surplus production model // *Ecol. Modell.* V. 313. P. 109–126.

Richards F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use // *J. Exp. Bot.* V. K. P. 290–300.

Russel F.S. 1931. Some theoretical considerations on the "overfishing" problem // *J. Cons. Intern. Explor. Mer.* V. 6. P. 3–27.

Schaefer M.B. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries // Bull. Intern. Amer. Trop. Tuna Comm. V. 11(6). P. 247–285.

Schnute J. 1977. Improved estimates from the Schaefer production model: theoretical consideration // J. Fish. Res. Board Canada. V. 34. P. 583–603.

Schnute J. 1979. A revised Schaefer model // Inv. Pesq. V. 43(1). P. 31–40.

Volterra V. 1928. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together // J. Cons. Intern. Explor. Mer. V. 3. P. 3–51.

Walter G.G. 1976. Non-equilibrium regulation of fisheries // ICNAF, Selected Pap. V. 1. P. 129–140.

Список изменений, внесенных в COMBI 4.0

Общая статистика изменений:

Увеличение длины программного кода почти в 2 раза за счет написания новых модулей и процедур.

Унификация стиля оформления всех элементов программы и приведение к единому образцу.

Интеграция в COMBI программного кода на языке R:

Настройка вызова R-среды из COMBI

Настройка передачи данных и программного кода из COMBI в R

Реализация новых возможностей в R-среде под управлением COMBI

Импорт результатов из R в COMBI и их последующая визуализация

Новые возможности и функции:

Проверка и информирование о наличии установленной среды R на компьютере пользователя;

Информирование о результате проверки данных на соответствие производственным моделям;

Унификация оформления графиков;

Распространение возможности удаления выбросов на все целевые функции;
Построение поверхности ошибок оценок параметров моделей в среде R;
Оптимизация работы блока "Расчет ориентиров";
Переработка блока обоснования ПРП;
Создание процедуры оптимизации ПРП;
Обработка и представление результатов оптимизации ПРП в среде R;
Добавление возможности удаления ПРП из списка;
Создание индикаторов выполнения расчетов программы
Изменение интерфейса блока "Коэффициенты эффективности";
Реализация анализа чувствительности операционной модели;
Добавление возможности сохранения всех результатов (табличных и графических) в файл;
Добавление интервальной оценки для прогнозных величин биомассы запаса и вылова;
Добавление списка пунктов приказа 104, реализованных в СОМБИ;
Модификация интерфейса с учетом новых возможностей.

Исправление программного кода предыдущей версии:

Исправление ошибок (модификация кода) при оценке параметров для модели Пелла-Томлинсона;
Исправление ошибок (модификация кода) при формировании таблицы решений;
Исправление ошибок (модификация кода) при расчете коэффициентов эффективности;
Исправление ошибок (модификация кода) при формировании списка ПРП;
Исправление ошибок (модификация кода) при оценке параметров моделей;
Исправление ошибок (модификация кода) обмена переменными между процедурами.