

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 639.2

**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЫРЬЕВЫХ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

© 2015 г. В. К. Бабаян

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,
Москва, 107140*

E-mail: vbabayan@vniro.ru

Поступила в редакцию 09.11.2015 г.

В статье рассматриваются основные особенности применения методов математического моделирования (математических моделей) для информационного обеспечения решений по рациональному использованию водных биоресурсов.

Ключевые слова: математическая модель, адекватность модели, сложность модели, множественность моделей, недоопределенность модели.

Начиная со второй половины прошлого века бурное развитие компьютерной техники и информационных технологий предопределило востребованность математических моделей, а точнее — методологии математического моделирования, существенно расширив возможности количественного анализа сложных биологических систем, что имеет огромное значение для прикладных исследований, к которым, в частности, относятся исследования, связанные с оценкой и рациональным использованием запасов промысловых гидробионтов. Как отмечает Г. Ю. Ризниченко (2003. С. 82), «преимущества математического анализа любых, в том числе популяционных, процессов очевидны. Математическое моделирование не только позволяет формализовать знания об объекте, но иногда (при хорошей изученности объекта) дать количественное описание процесса, предсказать его ход и эффективность, дать рекомендации по оптимизации управления этим процессом. Это особенно важно для биологических процессов, имеющих прикладное и промышленное значение».

Сущность методологии математического моделирования заключается в замене объекта исследования его аналогом, математической моделью, проведении с моде-

лью необходимых численных экспериментов и перенесении полученных результатов на исходный объект. Центральную роль в этом подходе играет математическая модель. Согласно общепринятому определению, математическая модель — это упрощенное описание рассматриваемого объекта или процесса, выполненное в удобной для анализа символической форме. Математическая символика не только делает описание изучаемого объекта предельно лаконичным, но и раскрывает принципиально новые возможности для его анализа. Ключевое понятие в приведенном выше определении — упрощенное описание. Оно означает, что модель учитывает только некоторую, как правило меньшую, часть параметров объекта моделирования, состав которых обуславливается целями проводимого исследования. Это позволяет выделить для исследования наиболее важные свойства объекта, абстрагируясь от несущественных его характеристик. Целостность модельного описания при этом сохраняется благодаря использованию различных гипотез и допущений.

Чтобы определить роль и место математического моделирования в современной, и прежде всего прикладной, науке, обратимся к каноническим формам научного

исследования, которые органично дополняют друг друга: эмпирическим и теоретическим исследованиям. Эмпирические исследования ограничены решением задач, включающих планирование и осуществление наблюдений и экспериментов, а также сбор и первичную обработку полученных с их помощью данных. Теоретические исследования направлены на более глубокое, сущностное познание изучаемого объекта на уровне понятий, категорий, законов и гипотез (Розенберг и др., 1994). Долгое время считалось, что математическое моделирование не более чем расширенное понятие эксперимента, однако в последнее время ему все чаще отводят самостоятельную роль, помещая между эмпирической и теоретической формами исследования (Белоцерковский, 2003; Новосельцев, 2006). Последняя точка зрения о месте математического моделирования в арсенале средств научного познания более оправдана: с одной стороны, математическое моделирование не подменяет собой эмпирические исследования, а напротив, стимулирует проведение необходимых натурных и лабораторных экспериментов; с другой стороны, моделирование позволяет не только оценить достоверность гипотез, принятых в процессе теоретических исследований, но и сформулировать новые гипотезы и получить новые знания об объекте, которые при его исследовании были недоступны (Анонимус, 2006, 2010). На рис. 1 показана взаимозависимость форм научных исследований с учетом математического моделирования.

Сегодня уже невозможно представить какую-либо область прикладной, и не только прикладной, науки без широкого применения математических моделей. Естественно поэтому, что проблема их эффективности вы-

зывает закономерный интерес у специалистов. Авторы ряда публикаций, анализируя свойства моделей, разделяли их на достоинства и недостатки, используя для этого различные критерии (Schnute, Richards, 2001; Новосельцев, 2004; Tonachella, 2011). Подобное разграничение представляется не совсем оправданным, поскольку одно и то же свойство модели в зависимости от целей исследования может быть истолковано и как ее достоинство, и как недостаток. Например, общее для всех математических моделей свойство — упрощенное описание объекта моделирования — может быть отнесено и к недостаткам модели, поскольку не учитывает всех свойств моделируемого объекта, и к ее достоинствам, если упрощение затрагивает лишь малозначимые для поставленной задачи факторы, позволяя тем самым существенно сузить область поиска решения. Поэтому, оценивая возможности математического моделирования как методологической основы оценки запасов и прогнозирования общих допустимых уловов (ОДУ), правильнее, видимо, говорить не о достоинствах и недостатках моделей, а об их особенностях, которые могут проявляться по-разному в зависимости от цели исследования.

Переходя к рассмотрению главных особенностей математических моделей, используемых в сырьевых рыбохозяйственных исследованиях для оценки запасов и обоснования допустимого промыслового изъятия, отметим, что прямо или косвенно все они тесно связаны с важнейшей спецификой запасов промысловых гидробионтов — их недоступностью для прямых наблюдений, что существенно осложняет изучение запасов и вносит неопределенность в результаты исследований. Упомя-

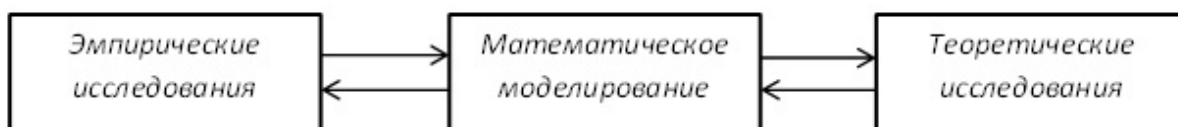


Рис. 1. Формы научных исследований.

нутое свойство значительно отличает подходы к оценке рыбных запасов от методов оценки запасов других биологических природных ресурсов, например лесных. В этой связи уместно привести высказывание, приписываемое английскому ученому Джону Шепарду: «Подсчет рыб в море схож с подсчетом деревьев в лесу за исключением того, что рыбы невидимы и постоянно перемещаются» (Hilborn, 2002. Р. 404).

Ниже рассматриваются основные особенности моделей запасов промысловых гидробионтов, которые необходимо учитывать при их выборе и использовании для оценки состояния запасов и обоснования ОДУ.

Адекватность математических моделей

В силу вышеупомянутой специфики водных биоресурсов при решении большинства практических задач рационального рыболовства математическое моделирование является наиболее распространенным, а часто и единственно возможным методом количественного анализа эксплуатируемых запасов промысловых гидробионтов, о состоянии запасов и динамике которых можно судить только по наблюдаемым косвенным показателям, связанным с биологическими характеристиками запаса рядом гипотетических зависимостей. Очевидно, что правомерность такой подмены полностью зависит от принятых гипотез в отношении причинно-следственных связей между внутренними и внешними факторами, корректность большинства которых нуждается в подтверждении. Это же относится и к формализованному, т.е. математическому, описанию запаса как целостной системы, функциональными элементами которой служат упомянутые выше зависимости. Следовательно, модель является описанием не столько истинного объекта, сколько представлений о нем, полнота и истинность которых определяются уровнем изученности объекта моделирования. Исходя из этого, модель можно определить как метафорическое, хотя иногда и точное, описание сущности (Hilborn, Mangel, 1997), что полностью исключает возможность создания абсолютно

идентичного модельного аналога исходного прототипа.

Неполное модельное описание запаса и, как правило, невысокое качество доступной информации делают чрезвычайно актуальной проблему обеспечения адекватности модели, т.е. ее соответствия объекту моделирования. Однако рассматривать адекватность как некоторое изначально присущее всем моделям качество, было бы не совсем правильно. Неоднозначность этого понятия требует его конкретизации при оценке потенциальной эффективности (при выборе) модели. В первую очередь, адекватность следует рассматривать только по определенным признакам — свойствам, принимаемым в данном исследовании за основные (Ахрем, 2007). Другими словами, понятие адекватности модели вовсе не означает абсолютную идентичность модели объекту моделирования по параметрам. Адекватной может быть и сильно упрощенная модель, если она обеспечивает приемлемое соответствие объекту моделирования по функциям, изучение которых является целью запланированного исследования. Если цель исследования меняется, то это влечет за собой необходимость пересмотра ранее учитываемых параметров, что означает переход к другой, более адекватной в новых условиях модели запаса. Таким образом, критерием адекватности модели служит не только полнота модельного описания рассматриваемого объекта промысла, но и то, насколько модель отвечает целям исследования. На практике установление адекватности математической модели реальному объекту осуществляется путем непосредственного сравнения (в смысле принятого критерия) выходных величин этого объекта с соответствующими выходными величинами модели (Ласт, 2004).

Следует особо отметить, что в последние годы отношение к адекватности модели претерпело значительные изменения, становясь все более прагматичным. «Об адекватности стали судить исключительно по тому, как модель помогает решению практических задач... Степень

близости модели своему физическому прототипу оказалась не критерием адекватности, а лишь следствием выбранного подхода» (Новосельцев, 2006. С. 5). Подобные представления об адекватности математических моделей прослеживаются также в области оценки и рационального использования сырьевой базы рыболовства. И это вполне естественно, поскольку именно практическая составляющая играет ведущую роль в прикладной науке. Моделей, идеально описывающих реальные запасы, не существует, однако лучшие из них, не будучи в достаточной степени адекватными запасам в классическом значении этого термина, позволяют, тем не менее, обеспечить приемлемую для практики концептуальную и информационную основу для принятия решений по управлению рыболовством.

Зависимость между точностью и сложностью моделей

Арсенал моделей, используемых для оценки запасов, достаточно представительен: от простых моделей прибавочной продукции, в которых все многообразие биологических процессов, протекающих в запасе, сводится к одному уравнению, до сложных структурированных, включающих целые системы уравнений и дающих более реалистическое представление о динамике популяций рыб. Под сложностью модели принято понимать ее размерность (т.е. число параметров модели); под точностью — степень близости модельной оценки к истинному значению оцениваемой величины с учетом качества входных данных. В теории увеличение числа параметров должно приближать модель к ее реальному прототипу и, следовательно, увеличивать точность и надежность получаемых с ее помощью результатов. Однако на практике такая связь далеко не очевидна, поскольку добавление в модель дополнительных параметров предполагает установление и включение в модель новых зависимостей, которые в большинстве случаев представляют собой формализацию далеко не однозначных гипотез (таковы, напри-

мер, гипотезы о зависимости запас—пополнение). Кроме того, повышение сложности модели за немногими исключениями влечет за собой и расширение структуры входной информации за счет новых данных, необходимых для оценки дополнительных параметров. Но поскольку и гипотезы, и входные данные несут в себе элементы неопределенности, неоправданное усложнение модели неизбежно отразится на достоверности результатов модельного анализа. Правомерно утверждать, что чем детальнее математическая модель описывает реальный запас, тем менее надежны результаты ее использования. По образному выражению академика Самарского (1979. С. 41) «... исследователь постоянно находится между Сциллой усложненности и Харибдой недостоверности. С одной стороны, построенная им модель должна быть простой в математическом отношении, чтобы ее можно было исследовать имеющимися средствами. С другой стороны, в результате всех упрощений она не должна утратить и существо проблемы». Более определенно высказались на эту тему Хилборн и Уолтерс, которые подробно рассмотрели этот вопрос и пришли к выводу о том, что между сложностью (числом параметров) модели и ее точностью существует обратная связь (Hilborn, Walters, 1992).

Типичным проявлением стремления исследователей к повышению адекватности модели, является введение в традиционные модели характеристик внешней среды. Изучая возможные последствия этого подхода на моделях запас—пополнение, Хилборн и Уолтерс выделили два источника потенциальной опасности. Во-первых, существует вероятность наличия такой переменной, которая хорошо коррелирует с большими отклонениями от основной кривой и в то же время совершенно не является причинно-связанной с ними, т.е. выявленная корреляция может оказаться фиктивной. Во-вторых, по мере включения в исходную модель запас—пополнение все большего числа факторов внешней среды идентификация модели будет улучшаться, а оценки параметров —

ухудшаться. В итоге можно получить модель, точно описывающую исторические данные, но совершенно непригодную для целей прогнозирования.

Следует особо отметить, что даже небольшое усложнение модели с целью повышения ее «гибкости» далеко не всегда приводит к ожидаемым результатам. Так, дополнительный по отношению к классической продукционной модели Шефера (Schaefer, 1954) параметр m в модели Пелла—Томлинсона (Pella, Tomlinson, 1969) заметно усложнил процедуру оценки параметров модели, но при этом не улучшил подгонку модели к наблюдаемым данным (Hilborn, Walters, 1992). Что же касается возможности значительного увеличения числа параметров модели, то, если их количество превысит некоторый критический уровень, математическая модель становится неуправляемой и, следовательно, непригодной для практического использования.

Приведенные выше примеры вызывают оправданное сомнение в том, что путем применения все более сложных математических моделей можно добиться повышения точности оценки запасов и прогнозов ОДУ в условиях низкого качества и неполноты наблюдаемых данных и, как следствие, недостаточной изученности механизма динамики численности запасов промысловых гидробионтов. Модели очень требовательны к данным, однако их информационное обеспечение не только не улучшается, но становится все хуже (O'Brien, 2011). Представление о том, что точность результатов, полученных с помощью модели, может превышать точность входных данных, не более чем иллюзия. Использование сложных моделей при заведомо некачественном информационном обеспечении редко приводит к ожидаемым результатам. Исходя из формальных соображений, сложные модели должны быть лучше, чем простые, потому что они более полно описывают объект моделирования. Однако поскольку входные данные всегда содержат неопределенность, то чем сложнее модель, тем менее надежны

результаты расчетов, выполненных на ее основе. Кроме того, если сложность модели слишком велика по сравнению с количеством надежных наблюдаемых данных, для ее идентификации приходится прибегать к ряду произвольных допущений, которые могут негативно повлиять на результаты модельного анализа. Исследования показали, что для решения задач оценки запасов в условиях недостаточно качественного информационного обеспечения простые модели оказываются более предпочтительными, поскольку в тех же условиях сложные модели во многом утрачивают способность продуцировать полезную информацию (Ludwig, Walters, 1989).

Множественность моделей

Множественность — это возможность формализованного описания одного и того же объекта или процесса с помощью нескольких математических моделей. На практике надежная информация о важнейших зависимостях между факторами, определяющими динамику рассматриваемой популяции, как правило, отсутствует. В таких случаях при моделировании недостаток твердых знаний компенсируется соответствующими гипотезами. Если существует несколько правдоподобных гипотез в отношении одной и той же зависимости, то им будут соответствовать и несколько равноценных моделей.

Эту особенность математического моделирования можно продемонстрировать на примере моделей прибавочной продукции (продукционных моделей). Законы популяционного роста (Verhulst, 1838; Gompertz, 1825; Pella, Tomlinson, 1969), лежащие в основе известных моделей прибавочной продукции, соответственно моделей Шефера (Schaefer, 1954), Фокса (Fox, 1970) и Пелла—Томлинсона (Pella, Tomlinson, 1969), можно представить в виде простых функциональных зависимостей, связывающих относительную скорость весового роста популяции $G(B) = 1/B \, dB/dt$ с ее текущей биомассой (B),

внутренней скоростью популяционного роста (r) и емкостью среды (K):

линейной функции $G(B) = r(1 - B/K)$,

логарифмической функции $G(B) = r(1 - \ln B / \ln K)$ и

степенной функции $G(B) = r[1 - (B/K)^m]$.

Различия в представлении популяционного роста обуславливают различия в построенных на их основе продукционных моделях, а следовательно, и в результатах модельных расчетов. На рис. 2 показаны кривые устойчивого улова, соответствующие этим трем моделям и рассчитанные с использованием реальной промысловой статистики для окуня моря Ирмингера (Babayan et al., 2013). Нетрудно заметить, насколько сильно различаются значения и координаты максимумов кривых (максимальных уравнированных уловов, MSY). Очевидно, что будут отличаться и производные от величины MSY биологические ориентиры по промысловой смертности и биомассе запаса. Если ни один из законов роста не обладает выраженными преимуществами перед остальными, это потребует особенно убедительной аргументации при обосновании выбора операционной версии продукционной модели.

Не менее наглядно свойство множественности математических моделей проявляется и в ряде других случаев, например,

при использовании зависимости запас—пополнение. Часто встречающаяся «аморфность» облака парных точек численности пополнения и биомассы родительского стада позволяет одинаково успешно аппроксимировать их несколькими функциональными зависимостями, основанными на разных гипотезах (Бивертон, Холт, 1969; Рикер, 1979; Shepherd, 1982).

Приведенные примеры показывают, что на практике свойство множественности модельного описания реальных объектов (запаса, популяции) не совместимо с единственностью решения задач оценки запасов из-за различий в моделях, а часто и во входных данных. Вместе с тем оно же позволяет рассмотреть объект моделирования как бы «с разных сторон» и составить о нем более полное представление. Принимая во внимание эту особенность математического моделирования, при количественном анализе запасов желательно использовать все модели, применение которых допускает имеющаяся информация, а окончательные выводы формулировать с учетом результатов, полученных с помощью разных моделей. Такая рекомендация содержится в работах многих авторитетных ученых, три выдержки из которых приведены ниже.

«При изучении запаса рыб, конечно же, не следует ограничиваться каким-либо (одним) методом. Оно должно быть всесторонним и опираться на комбинацию нескольких

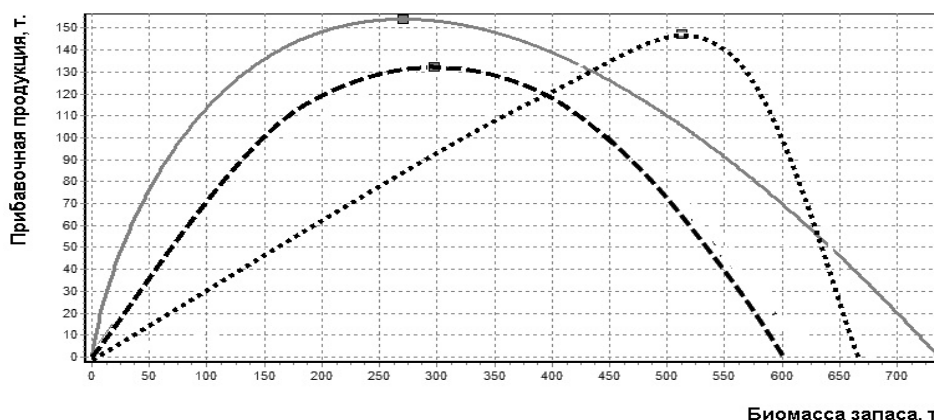


Рис. 2. Кривые устойчивого улова для окуня моря Ирмингера, построенные с помощью моделей Шефера (---), Фокса (—), Пелла—Томлинсона (....).

методов. Если последние до некоторой степени перекрывают друг друга в смысле обеспечения раздельной оценки одних и тех же параметров популяции, то это обстоятельство обеспечивает крайне полезный контроль за точностью вычислений» (Рикер, 1970. С. 7).

«Анализируя промысел, крайне необходимо избегать использования единственного «наилучшего» метода; идея, что некоторая модель является наилучшей и единственной моделью, которую следует использовать для оценки данного запаса, — опасное заблуждение». И далее: «Качественная оценка запаса достигается только через тщательное перекрестное сравнение и исчерпывающий анализ результатов, полученных с использованием альтернативных моделей и наборов данных» (Musick, Bonfil, 2004. Р. 14).

«Не существует «наилучшей» модели, которая должна использоваться для оценки промыслового запаса. Наилучшая процедура оценки та, в которой используются все модели, применимые в зависимости от имеющихся данных, и сравниваются результаты расчетов по всем моделям, чтобы выявить несоответствия, совпадения и особенности» (Tonachella, 2011. Р. 37).

Еще одно применение свойство множественности моделей получило в методе оценки стратегий управления рыболовством (MSE) (Smith, 1993; Shelton P., Shelton B., 2011), в рамках которого динамика рассматриваемого запаса может быть описана всеми доступными моделями. При этом с точки зрения адекватности рассматриваемому запасу все модели считаются равноценными, а соответствующие им варианты динамики — равновероятными. Метод позволяет обосновать такую стратегию управления запасом, формализованную в виде правила регулирования промысла (ПРП), которая обеспечивает устойчивую результативность управления промыслом при всех возможных версиях его динамики. Процедура оценки робастной стратегии управления схематично изображена на рис. 3.

Суть метода заключается в том, что с помощью каждой из включенных в рассмотрение моделей динамики (МД) запаса последовательно имитируется процесс управления промыслом на основе каждого из тестируемых ПРП на протяжении заданного периода времени, после чего результаты численных экспериментов преобразуются

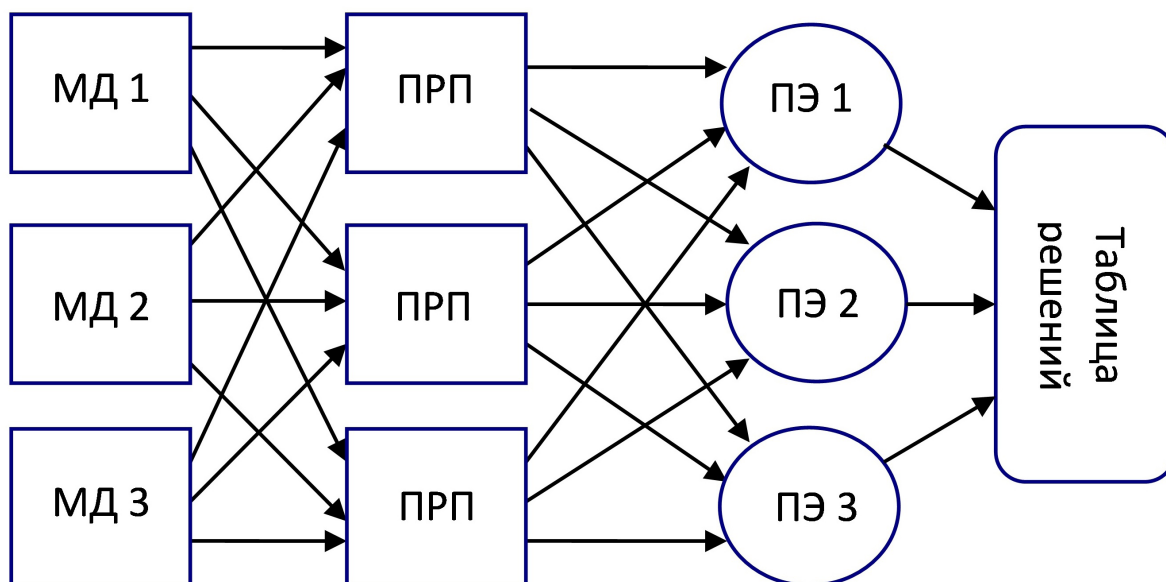


Рис. 3. Принципиальная схема тестирования стратегий управления: МД — модель динамики, ПРП — правило регулирования промысла, ПЭ — показатель эффективности.

в значения предварительно выбранных показателей эффективности (ПЭ) управления и заносятся в таблицу решений. Сравнительный анализ полученных решений позволяет выявить ПРП, которое обеспечивает лучшую эффективность по совокупности всех показателей для всех версий динамики запаса.

Рассматриваемая особенность моделей тесно граничит с проблемой их выбора для практических расчетов. К настоящему времени разработано большое количество математических моделей, область применения которых охватывает все сколько-нибудь значимые виды гидробионтов. При этом большинство моделей, используемых в профильных международных организациях, открыто в Интернете для свободного доступа вместе с программным обеспечением. Это кардинально снижает потребность в разработке новых моделей, заменяя ее выбором подходящей модели из числа доступных с последующей (в случае необходимости) адаптацией к конкретному запасу. Выбор операционных моделей, на результатах использования которых в конечном счете и будут основаны рекомендации промыслу, представляет собой сложную и принципиально важную задачу. Главным критерием выбора среди нескольких конкурирующих моделей является степень их соответствия наблюдаемым данным. И, хотя существование идеальной модели исключено по определению, одна из тестируемых моделей может оказаться предпочтительнее, если она более совместима с имеющимися данными, чем любая другая из моделей-конкурентов. Могут быть отобраны и сразу несколько моделей, если каждая лучше согласуется с отдельными характеристиками наблюдаемых данных, но при этом ни одна из них не доминирует над остальными (Hilborn, Mangel, 1997). Неудачный выбор базовых моделей приводит к заведомо ошибочным результатам независимо от того, для решения каких задач будут использованы эти модели.

Недоопределенность моделей

В моделях запасов промысловых гидробионтов наблюдаемые данные, напри-

мер уловы, промысловые усилия, размерная структура уловов и средние навески по возрастным группам, функционально связаны с неизвестными параметрами, требующими оценки, такими как численность и биомасса запаса. Количество неизвестных обычно намного превышает число доступных наблюдаемых данных, что трактуется как недоопределенность модели. На практике недоопределенность присуща всем структурированным моделям запаса, поэтому ее допустимо рассматривать в качестве их общей особенности. Чтобы в таких условиях оценить параметры модели, необходимо как минимум уравнивать их количество с количеством известных величин. Поскольку массивы исходных данных ограничены, проблема достижения соответствия числа неизвестных числу наблюдаемых данных решается с помощью искусственных приемов — различных упрощений и допущений, направленных на сокращение числа неизвестных. Процесс преобразования исходной модели в модель с меньшим числом переменных и ограничений называется агрегированием. К агрегированию приходится прибегать, даже несмотря на то что это может негативно повлиять на результаты модельного анализа (Schnute, Richards, 2001). При использовании сложных биологически структурированных моделей (например, когортных) сокращение числа неизвестных параметров достигается путем перевода части неизвестных переменных в категорию постоянных величин и выражения отдельных неизвестных через известные переменные. Такие допущения остаются справедливыми, пока биологические процессы, протекающие в запасе, сохраняют относительную стабильность. Очевидно, что использование подобных приемов при идентификации модели обеспечивает единственность решения только в рамках принятых допущений, которые не всегда полностью отвечают реальным свойствам объекта моделирования.

Обсуждение и выводы

При моделировании запасов промысловых гидробионтов дефицит необходимых

знаний частично восполняется различными гипотезами, которые не только упрощают, но и в какой-то степени идеализируют объект моделирования. Наглядным примером этого могут служить равновесные продукционные модели, в основе которых лежат допущения о постоянстве условий среды обитания рассматриваемого запаса и об отсутствии переходных процессов при резком изменении интенсивности промысла или биомассы запаса. Принимая во внимание, что гипотезы — не более чем предположения, зачастую не подкрепленные убедительной аргументацией, математическую модель, построенную на таких гипотезах, правомерно считать аналогом не столько реального запаса, сколько наших представлений о нем, сформированных на основе ограниченной и не всегда качественной доступной информации. Анализируя эту специфику моделей промысловых гидробионтов, Шнютте и Ричардс предложили термин «фишметика» (как противопоставление слову «арифметика»), которым охарактеризовали определенную условность, свойственную способам построения и использования моделей запасов водных биоресурсов (Schnute, Richards, 2001). Термин «фишметика» служит напоминанием о том, что в реальности формирование динамики численности промысловых гидробионтов далеко не всегда подчиняется строгим математическим законам, зафиксированным в уравнениях моделей. Это существенно усложняет задачу оценки и прогнозирования состояния запасов, заставляя разработчиков включать в рассмотрение всю дополнительную информацию об объекте оценки, которая не была использована в моделях. Необходимость комплексного анализа всей доступной информации исключает применение стандартных подходов к поиску решения, сближая тем самым работу исследователя с работой детектива, который собирает разрозненные улики в логически непротиворечивую картину (Schnute, 1987). Обоснование рекомендаций по рациональному использованию сырьевой базы рыболовства с использованием моделей часто выходит за рамки поиска тривиаль-

ных решений, требуя от разработчика помимо хорошей профессиональной подготовки творческого отношения к делу. Не случайно «математическое моделирование многие считают скорее искусством, чем стройной и законченной теорией. Здесь очень велика роль опыта, интуиции и других интеллектуальных качеств человека» (Anonimus, 2010).

Главная трудность оценки запасов водных биоресурсов заключается в наличии большого количества источников неопределенности на всех этапах решения этой задачи: от ошибок в исходных данных до ошибок, связанных с недостаточной адекватностью модели. Чтобы в этих условиях получить приемлемые для практики результаты, необходим последовательный и строгий контроль за ходом решения. Наиболее обоснованным критерием достоверности результатов модельных расчетов служит их соответствие наблюдаемым (фактическим) данным. Количественный анализ и прогнозирование состояния запасов должны выполняться в контексте всех доступных на момент проведения расчетов сведений по биологии, экологии и промыслу рассматриваемого запаса. На практике это означает, что на всех этапах разработки рекомендаций по объемам ОДУ и другим мерам регулирования рыболовства необходимо сопоставлять полученные результаты вычислений с соответствующими данными промысловой статистики и научных наблюдений. В случае выявления принципиальных противоречий их причины должны быть тщательно изучены, а в расчеты внесены соответствующие изменения, восстанавливающие корректность рекомендаций, предназначенных для формирования управленческих решений.

Математическое моделирование является наиболее эффективной, а часто и единственно возможной методологией количественного анализа водных биологических ресурсов, которая позволяет не только получить оценки текущего и ретроспективного состояний запаса, но и, что самое главное, оптимизировать стратегию его промыслового использования. Практика рыбохозяйственных исследований свидетельствует о том,

что на протяжении многих десятилетий эта методология была и остается наиболее востребованным инструментом для оценки и прогнозирования сырьевой базы рыболовства, прежде всего, морского. Однако использование математических моделей само по себе еще не гарантирует получение хороших результатов. Можно указать три основные причины, которые снижают обоснованность научных рекомендаций промыслу, разработанных с использованием математических моделей.

Во-первых, невысокое качество доступных данных. Если данные содержат существенные ошибки, в том числе систематические, которые нельзя полностью отфильтровать известными способами, то получение достоверного результата в таком случае практически невозможно. Необходимо также учитывать, что чем сложнее модель, тем сильнее результаты оценки зависят от качества данных. Если надежность доступных данных вызывает обоснованные сомнения, то будет правильным отказаться от использования сложных моделей, требующих большого количества входных данных, в пользу более простых моделей, информационные потребности которых намного скромнее и ограничены более качественными данными. Например, хорошей альтернативой когортным моделям в ряде случаев могут служить динамические продукционные модели.

Во-вторых, неудачный выбор модели. Как правило, виной этому бывает излишняя вера исследователя в непогрешимость используемой им модели (особенно если это его собственная разработка или единственная модель, которую он освоил). Поскольку, по определению, ни одна из моделей не учитывает все факторы, способные повлиять на динамику численности, в выбранной для расчетов модели обязательно будут отсутствовать некоторые из таких факторов. Это может проявиться в недостаточной адекватности модели фактической динамике запаса со всеми вытекающими отсюда последствиями. Чтобы предотвратить такую возможность, рекомендуется в каждом случае использовать вместо одной модели сразу

несколько, а окончательные выводы делать на основе перекрестного анализа результатов, полученных с помощью всех моделей.

В-третьих, дефицит специалистов, профессиональная квалификация которых отвечает современным требованиям к оценке состояния и перспектив промыслового использования водных биологических ресурсов. Причиной большинства неудач при использовании методологии математического моделирования являются не недостатки модели как таковой, а некомпетентность исследователя, который либо допустил ошибку в выборе модели, не приняв в расчет качество имеющихся данных, особенности объекта оценки и ограничения модели, либо неправильно интерпретировал полученные с ее помощью результаты. Некомпетентность исследователя неизбежно приводит к ошибкам, незаслуженно дискредитируя сам подход.

К этому следует добавить, что за последнее время квалификационные требования к специалистам в области оценки и рационального использования сырьевой базы рыболовства существенно ужесточились. Продолжающееся усложнение используемых в этой области математических моделей и вычислительных технологий значительно опережает рост числа специалистов, отвечающих новым требованиям. По утверждению Келли и Кодлинга, «существует лишь ограниченное количество ученых, которые могут выполнять работы по мониторингу и оценке запасов на уровне современных требований, и эту проблему нельзя преодолеть за короткое время, просто выделяя больше денег» (Kelly, Codling, 2006. P. 235). Таким образом, в отсутствие потенциальных пользователей новыми, более продвинутыми методами повышение среднего профессионального уровня специалистов представляется не менее важной задачей, чем дальнейшее совершенствование существующих методологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахрем А. А. Математические методы анализа адекватности моделей сложных тех-

нических объектов // Тр. ИСА РАН. 2007. Т. 29. С. 245–264.

Белоцерковский О. М. Новый век — новые подходы к турбулентности на основе передовых технологий математического моделирования и параллельных вычислений // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 3–15.

Бивертон Р., Холт С. Динамика численности промысловых рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1969. 248 с.

Ласт Е. В. Разработка и исследование математической модели динамики численности многовозрастной лимитированной популяции: Автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. Владивосток: Ин-т автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 2002. 22 с.

Новосельцев В. Н. Достоинства и недостатки математического моделирования // Фундамент. исследования. 2004. Вып. 6. С. 121–122.

Новосельцев В. Н. Математическое моделирование в биологии: системы, способные жить и умирать // Автоматика и телемеханика. 2006. Вып. 6. С. 3–26.

Ризниченко Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии. М.; Ижевск: Ин-т комплекс. исследований, 2003. 183 с.

Рикер У. Е. Биостатистический метод А. Н. Державина // Рыб. хоз-во. 1970. № 11. С. 5–7.

Рикер У. Е. Методы оценки и интерпретация биологических показателей популяций рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1979. 408 с.

Розенберг Г. С., Шитиков В. К., Брусиловский П. М. Экологическое прогнозирование (функциональные предикторы временных рядов). Тольятти: Ин-т экологии Волж. бассейна РАН. 1994. 182 с.

Самарский А. А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестн. АН СССР. 1979. № 5. С. 38–49.

Anonimus. Достоинства и недостатки математических моделей // Прогнозы и прогнозирование. 2006. (<http://prognoz.org/lib/dostoinstva-i-nedostatki-matematicheskikh-modelei>).

Anonimus. Принципы и подходы к построению математических моделей // Там же. 2010. (http://edu.dvgups.ru/METDOC/EK MEN / MEN / SIST_ + UPR / UMKDO/LEK/Lek_4_2.htm)

Babayan V., Antonov I., Bulgakova T. et al. Russian assessment of stock status and commercial potential of redfish in the Irminger Sea // ICES NWWG. 2013. World Doc. № 24. 9 p.

Fox W. W. An exponential yield model for optimizing exploited fish populations // Trans. Amer. Fish. Soc. 1970. № 99. P. 80–88.

Gompertz B. 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 // Philos. Frans. R. Soc. 1825. V. 115.— P. 515–585.

Hilborn R. The dark side of reference points // Bull. Marine Sci. 2002. V. 70. № 2. P. 403–408.

Hilborn R., Mangel M. The ecological detective: confronting models with data. Princeton: Princeton Univ. Press, 1997. 315 p.

Hilborn R., Walters C. J. Quantitative fisheries stock assessment. Choice, dynamics and uncertainty. N.Y.: Chapman and Hall, 1992. 570 p.

Kelly C. J., Codling E. A. «Cheap and dirty» fisheries science and management in the North Atlantic // Fish. Res. 2006. V. 79. P. 233–238.

Ludwig D., Walters C. J. A robust method for parameter estimation from catch and effort data // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1989. V. 46. P. 137–144.

Musick J. A., Bonfil R. (Eds). Elasmobranch fisheries management techniques // APEC Fish. Working Group. 2004. 370 p.

O'Brien K. Why we need new thinking — the root and branch review of science // Present. Symp. «New challenges and opportunities facing marine fisheries science». Ostend, Great Britain, 2011.

Pella J. J., Tomlinson P. K. A generalized stock production model // Bull. Intern. Amer. Trop. Tuna. Comm. 1969. V. 13. № 3. P. 419–496.

- Schaefer M.B.* Some aspects of the dynamic of populations important to the management of the commercial marine fisheries // *Ibid.* 1954. V. 1. № 2. P. 27–56.
- Schnute J.T.* Data, uncertainty, model ambiguity, and model identification // *Nat. Res. Modeling.* 1987. V. 2. P. 159–212.
- Schnute J.T., Richards L.J.* Use and abuse of fishery models // *Canad. J. Fish. Aquatic Sci.* 2001. V. 58. P. 10–17.
- Shelton P., Shelton B.* Evaluation exceptional circumstances in the context of the Greenland halibut management strategy evaluation based on the 2011 stock assessment // *NAFO SC Working Paper* 11/40. 2011. 18 p.
- Shepherd J.G.* A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries, and the construction of sustainable yield curves // *J. Cons. Intern. Explor. Mer.* 1982. V. 40. № 1. P. 67–75.
- Smith A.D.M.* Management strategy evaluation – the light on the hill // *Population dynamics for fishery management. Workshop, Western Australia: Austral. Soc. Fish. Biol.* 1993. P. 249–253.
- Tonachella N.* Review on elasmobranchs stock assessment methods. Rome: *FAO (GFCM)*, 2011. 44 p.
- Verhulst P.F.* Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // *Cores. Math. Phys.* 1838. V. 10. P. 113–121.

SOME FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING IN FISHERIES RESEARCH

© 2015 г. V.K. Babayan

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, 107140

The article discusses the main features of the application of mathematical modeling (mathematical models) for providing information support to management decisions on the rational use of aquatic biological resources.

Keywords: mathematical model, model adequacy, model complexity, model multiplicity, underdetermined model.