

УДК 639.2 (265.53)

СТАНОВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СахНИРО: УСПЕХИ И ПРОБЛЕМЫ РОСТА

А. А. Михеев (alex_mikheyev@sakhniro.ru)

Сахалинский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск)

Михеев, А. А. Становление математического моделирования в СахНИРО: успехи и проблемы роста [Текст] / А. А. Михеев // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2012. – Т. 13. – С. 61–82.

В статье дается краткое описание этапов развития исследований в области приложения математического моделирования к задачам рыбохозяйственного прогнозирования в СахНИРО. Первые ростки этого рода исследований появились давно – в начале 1970-х гг., и совпали с преобразованием Сахалинского отделения в Сахалинский филиал ТИНРО (СахТИНРО). Во второй половине 1970-х и начале 1980-х гг. были выполнены отдельные исследования по динамике численности и популяционным параметрам морских рыб и млекопитающих, а также горбуши, в той или иной мере использующие математическое моделирование.

В начале 1990-х гг. с целью использования современных методов математической обработки биологического материала и обоснования прогнозов был создан сектор прикладной математики. Однако предпринятые в 1990-е гг. меры по улучшению качества прогнозов и научных результатов носили сугубо формальный характер и в итоге мало к чему привели. Вместе с тем в тот период был выполнен целый ряд исследований, касающихся математических моделей динамики численности.

В 2000-е гг. в СахНИРО была создана благоприятная обстановка для исследований в области математического моделирования на базе лаборатории промысловых беспозвоночных. Была поставлена цель: построить набор популяционных моделей, позволяющих на доступной информации получать оценки запасов, строить прогноз и определять рациональное изъятие беспозвоночных. Планомерная реализация указанной цели, начатая с 1998 г., завершилась в 2010 г.

Сегодня работы по математическому моделированию в СахНИРО ведутся в русле новых тенденций, наметившихся в данной области в последнее десятилетие. Современное управление водными биоресурсами базируется на сочетании трех основных подходов: экосистемного, мультииндикаторного и зонального.

Табл. – 2, ил. – 15, фото – 2, библиогр. – 54.

Mikheyev, A. A. Development of mathematical modeling in SakhNIRO: successes and problems [Text] / A. A. Mikheyev // Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. – Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2012. – Vol. 13. – P. 61–82.

Stages of research development in applying mathematical modeling to the tasks of fisheries forecasting in SakhNIRO are briefly described. The first manifestations of such researches appeared long ago – in the beginning of the 1970s, and coincided with the reorganization of Sakhalin department into Sakhalin branch of TINRO (SakhTINRO). In the second half of the 1970s and early 1980s, there were performed studies on abundance dynamics and population parameters of marine fishes and mammals and also pink salmon which somehow used mathematical modeling.

In the early 1990s, a Sector of Applied Mathematics was created to use modern methods for mathematical processing of biological materials and forecast foundation. However, the measures used in the 1990s to improve a quality of forecasts and scientific surveys were formal and had poor results. But in that period there was performed a series of studies on mathematical models of abundance dynamics.

In the 2000s, favorable conditions were created in SakhNIRO on the base of Laboratory of Commercial Invertebrates for studies that applied mathematical modeling. The purpose was: to create a series of population models that allow us to assess stock abundance, make forecasts, and define rational capture of invertebrates using the available information. A regular realization of this purpose, started in 1998, was completed in 2010.

Nowadays the works on mathematical modeling in SakhNIRO are conducted within the new trends, observed in this field in the recent decade. The contemporary management of water biological resources is based on combination of the three main approaches: ecosystem, multi-indicator, and zonal.

Table – 2, fig. – 15, photo – 2, ref. – 54.

Роль математического моделирования в рыбохозяйственных исследованиях всегда оценивалась неоднозначно (Баранов, 1956; Schnute, Richards, 2001). С одной стороны, данный тип научного исследования закономерно появляется на пути развития любой естественной науки. С другой стороны, имеющиеся знания о морских популяциях, биоценозах и экосистемах – сложно организованных и плохо наблюдаемых объектах – сегодня не всегда, когда требуется, позволяют найти им адекватную математическую формализацию. Тем не менее, это не повод для отрицания потенциала математического описания в теории рыболовства. Труды Федора Ивановича Баранова, помимо своей педагогической значимости, не теряют на сегодняшний день и практической актуальности, несмотря на почти вековой возраст (Баранов, 1918, 1925, 1925а, б). Предназначение математического моделирования в рыбохозяйственных исследованиях, как его сегодня понимают ведущие специалисты в этой области, заключается, в первую очередь, в формировании независимого дополнительного взгляда на происходящее (Schnute, Richards, 2001). Ценность такого взгляда будет тем выше, чем неожиданнее окажется ракурс, под который он был сделан.

Сформулированной точки зрения на роль математического моделирования в рыбохозяйственной науке придерживается, по его собственному признанию, и Александр Вячеславович Буслов – нынешний директор СахНИРО. С его приходом в этом качестве в 2010 г. математическое моделирование в институте оформилось как самостоятельное направление исследований, нацеленное, в первую очередь, на поддержку работ по оценке запасов и прогнозированию.

Вместе с тем первые ростки этого рода исследований появились давно – в начале 1970-х гг. – и совпали с преобразованием Сахалинского отделения в Сахалинский филиал ТИНРО (СахТИНРО). Руководил институтом в тот период (1972–1985 гг.) Владимир Николаевич Гиренко, который посылно пополнял кадры в связи с грядущим обновлением НИИ и переездом в 1975 г. с побережья в областной центр. Тем самым был вызван приток новых специалистов, имеющих представление о применении рыбопромысловых моделей, биометрии и математической статистики в ихтиологических исследованиях (см., например, Ефанов, 1976; Рихтер, Ефанов, 1977). По воспоминаниям старейшего работника СахНИРО Анатолия Яковлевича Великанова, в институте в указанные годы активно использовалась известная аналитическая модель Бивертон–Холта, а позднее ВПА, и ряд других.

Научные работы с применением математического аппарата в СахТИНРО во второй половине семидесятых и начале восьмидесятых были связаны преимущественно с именем Юрия Андреевича Колесника. Круг интересов Ю. А. Колесника охватывал вопросы применения методов математической статистики. Его научные публикации касались таких тем, как анализ популяционных и промысловых данных, поиск абиотических предикторов, исследование периодичности и стохастичности в динамике численности морских гидробионтов, их связи с климатом региона и космофизическими факторами (Колесник, 1975; Колесник, Когай, 1977; Колесник, Соболевский, 1978; Колесник, Тимофеева, 1982). Важным методическим пособием по применению методов математической статистики к рыбохозяйственным исследованиям в рассматриваемый период стала книга, в написании которой принимал участие и Ю. А. Колесник (Киткин и др., 1984).

В этот же период в СахТИНРО были выполнены отдельные исследования по динамике численности и популяционным параметрам горбуши, в той или иной мере использующие математическое моделирование (Ефанов и др., 1978). Завершились 1980-е двумя работами, несомненно, имеющими научную ценность (Климов и др., 1986; Ефанов, Скалецкая, 1990). В первой из них была выдвинута любопытная гипотеза о роли температурной цикличности в формировании и смене доминирующих по численности поколений горбуши. Вторая публикация стала итогом разработки междисциплинарным коллективом специалистов многофазной модели динамики численности горбуши. К сожалению, обе названные работы не получили продолжения в последующие годы, а их результаты остались без применения.

В конце восьмидесятых (1985–1989 гг.), когда директором СахТИНРО был Владимир Дмитриевич Табунков, при подготовке прогнозов и написании научных отчетов предъявлялись достаточно высокие требования к уровню их математического обоснования. Подавляющее большинство научных сотрудников в те годы использовали математические модели рыболовства и динамики численности популяций, а отдельные неплохо ими владели. Валерий Николаевич Ефанов регулярно проводил семинары по классическим моделям теории рыболовства и методам биометрии. Такая ситуация была прямым следствием пристального внимания к прогнозам и научным результатам сотрудников со стороны заведующих лабораториями и директора СахТИНРО и выше по цепочке: ТИНРО, ВНИРО и т. д. К слову сказать, авторитет рыбохозяйственной науки в органах власти в те времена был несравнимо выше сегодняшнего. И хотя можно было бы желать большего в отношении приложений математиче-

ского моделирования к рыбохозяйственным исследованиям в 1970–1980-е, заложенный в эти годы уровень научной работы не допустил фатального исхода в тяжелую эпоху «перестройки».

Произошедший в начале 1990-х гг. исторический перелом не мог не сказаться на судьбе рыбохозяйственной науки. Логическим завершением той социально-экономической неразберихи для СахТИНРО стал его переход в 1995 г. на «самостоятельные рельсы» и преобразование в новую организационную форму – ФГУП «СахНИРО». Руководство институтом с 1989 по 2001 г. осуществлял выбранный коллективом на эту должность Феликс Николаевич Рухлов. Навязанное обстоятельствами с началом «перестройки» и позднее узаконенное государством «самофинансирование» институтов оказало двойное влияние на СахТИНРО–СахНИРО. Прямым следствием этого влияния стала возможность повысить заработки сотрудников за счет так называемых коммерческих рейсов и хоздоговорных работ. Вместе с тем участие в этих работах было столь привлекательным, что стало для большинства главной целью пребывания в институте, что не могло не отразиться негативно на качестве научных исследований. Понимая это, руководство института предприняло ряд мер с целью если и не исправить, то хотя бы скорректировать ситуацию к лучшему. Так, в 1990 г. с целью использования современных методов математической обработки биологического материала и обоснования прогнозов создали сектор прикладной математики. В дальнейшем, до 1993 г. были созданы сектор информационного обеспечения и группа экосистемных исследований. Названные подразделения должны были по замыслу их создателей поправить дела по хранению и обработке первичной информации с помощью баз данных и по моделированию реакций морской экосистемы на освоение нефтяных месторождений восточного шельфа о. Сахалин соответственно.

Сектором прикладной математики в СахТИНРО–СахНИРО в период его существования (1990–2000 гг.) руководил Георгий Андреевич Октябрьский, который до этого возглавлял лабораторию прикладной математики ТИНРО. С его приходом в СахТИНРО связано несколько научных работ, не имеющих принципиального значения для развития математического моделирования в институте, а рассматривающих частные прикладные вопросы (Иванова, Октябрьский, 1990; Каева, Октябрьский, 1990; Зверькова, Октябрьский, 1994; Октябрьский, Снытко, 1998; Октябрьский, Швыдкий, 2000). Исключением следует назвать разработку концепции базиса популяционных данных (Октябрьский, 1991). По замыслу Г. А. Октябрьского следовало установить совокупность видов информации, необходимой и достаточной для определения полного набора популяционных характеристик, используемых в математических моделях сырьевого прогнозирования. Тогда базис популяционных данных по определению – это минимум указанной совокупности (Октябрьский, 1991). Несмотря на кажущуюся замысловатость и искусственность, данная концепция несла в себе плодотворную стратегическую идею: очертить круг необходимых и достаточных средств решения основных задач – прогноза запаса и определения изъятия.

Группой экосистемных исследований в рассматриваемый период времени было выполнено обобщение многолетней экологической информации по северо-восточному шельфу о. Сахалин с целью определить основные тенденции в динамике значимых характеристик шельфовой экосистемы. Указанная работа завершилась многомерным статистическим анализом пространствен-

ной неоднородности абиотической среды для рассматриваемого района, результаты которого были опубликованы (Михеев, 1999).

Трудности, связанные с острым недостатком финансирования, особенно в начале 1990-х гг., привели к сокращению штата и закрытию целого ряда подразделений, в том числе группы экосистемных исследований и двух секторов – информационного обеспечения и прикладной математики. Таким образом, предпринятые меры по улучшению качества прогнозов и научных результатов носили сугубо формальный характер и в итоге мало к чему привели. Экосистемные работы были свернуты до уровня мелких внутренних водоемов и экологических и природоохранных работ по контрактам с компаниями-операторами нефтяных проектов, реализуемых на восточном шельфе о. Сахалин.

Общественная база данных не создана до сих пор. Однако отдельные исследования и разработки, касающиеся математических моделей динамики численности, были выполнены в конце 1980-х – начале 1990-х гг. вне тематических планов. Была построена модель «скат–возврат» для горбуши, учитывающая депенсационный эффект Олли (Михеев, 1987), исследованы свойства виртуально-популяционного анализа, относящиеся к процедуре настройки (Михеев, 1991, 1991a), создана модель динамики подходов горбуши на основе дискретного квадратичного отображения в качестве репродуктивной функции с белым шумом в коэффициенте репродукции (Михеев, 1996; Mikheyev, 1996). Резюмируя, ситуацию с математическим моделированием в институте в «перестроечный» период можно охарактеризовать как время глубокой стагнации. Вместе с тем угли некогда горевшего костра – почти незаметные, но хранящие в себе память былой активности – продолжали тлеть, оставляя надежду на возрождение.

В январе 2001 г. институт возглавил Владимир Иванович Радченко, назначенный на эту должность Госкомрыболовством РФ. До этого назначения он работал заместителем директора ТИПРО-Центра по научным вопросам. В бытность директором В. И. Радченко создал самую благоприятную обстановку для того, чтобы исследования в области математического моделирования в СахНИРО были продолжены и, более того, интенсифицированы. Однако было принято решение отдельное подразделение не создавать, поскольку в институте отсутствовало достаточное число специалистов с математической подготовкой. Вместо этого работы по математическому моделированию были сосредоточены в лаборатории промысловых беспозвоночных.

Особенности биологии и промысла беспозвоночных не позволяли использовать традиционные модели теории рыболовства и требовали создания новых. Наряду с этим регулирование промысла беспозвоночных в 1990-е гг. в условиях интенсивной эксплуатации и масштабного браконьерства остро нуждалось в оценках запасов и допустимых уловов. Была поставлена цель: построить набор популяционных моделей, позволяющих на доступной информации получать оценки запасов, строить прогноз и определять рациональное изъятие беспозвоночных. Плановая реализация указанной цели, начатая с 1998 г., завершилась в 2010 г. Первым был внедрен классический метод анализа кривой вылова на основе равновесной модели возрастной структуры запаса (Михеев, 1999a). Метод был адаптирован к популяциям, чей промысловый запас состоял исключительно из самцов. С его помощью можно было оценивать смертность и прогнозировать с двухгодичной заблаговременностью запас на основе размерного состава уловов и текущих материалов траловых учетов.

В ту пору был построен комплекс из еще четырех математических моделей для оценки запасов и прогнозирования промысловых беспозвоночных. Указанный комплекс формировался по принципу: моделируем все процессы в запасе, необходимые и достаточные для решения задач прогнозирования. Данный подход к разработке моделей был основан на идее Г. А. Октябрьского о базисе популяционных данных. В указанный комплекс входили: стохастический когортный анализ процессов (СКАП) (Михеев, 2003, 2004, 2009); обобщенная модель Лесли с фильтром Калмана (ОМЛ ФК) (Михеев, Михеев, 2007; Михеев и др., 2010, 2012); модель промыслового действия ловушки (МПДЛ) (Михеев, 2001; Михеев, Михеев, 2008; Михеев, в печати); модель смеси вероятностных распределений (СВР) (Михеев, 2011). В работах по математическому моделированию не была забыта и горбуша – важнейший рыбный ресурс Сахалинской области. Прогнозирование подходов этого промыслового объекта всегда было актуальной задачей для научных исследований в институте. Для решения указанной задачи была разработана нестационарная модель Рикера с фильтром Калмана (НМР ФК) (Михеев, 2004а, 2006).

Начиная с 2006 г. пять последних названных моделей были реализованы в виде компьютерных программ единого стандарта. В них использовались современные математические средства обработки и анализа данных, широко применяемые в мировой рыбохозяйственной науке: фильтр Калмана (Schnute, 1994); нечеткие логики (Saila, 1996; см. также Рутковская и др., 2004); алгоритмы SEM (Айвазян и др., 1989) и SIR (Perry et al., 1999); стохастическое моделирование (Бабаян, 2000); имитационное индивидуально-ориентированное поведенческое моделирование.

Все математические модели можно разделить на две категории: оценочные модели, основная цель которых – оценить ненаблюдаемые характеристики по доступным данным, и имитационные, предназначенные, скорее, для качественного исследования какого-либо феномена. Тогда к первой категории можно отнести модели СКАП, ОМЛ ФК, СВР и НМР ФК, а ко второй – МПДЛ. Для моделей первой категории важным атрибутом является метод подгонки модели к данным наблюдений. Имеется существенное отличие разработанных в СахНИРО оценочных моделей от большинства аналогичных классических и ныне существующих в отрасли. Оно заключается в использовании для подгонки специального гибридного оптимизатора, весьма эффективного для многопараметрических рыбопромысловых моделей (Михеев и др., 2006). Указанный оптимизатор сочетает большое число традиционных градиентных методов и эволюционный стохастический поиск, известный как генетический алгоритм (Рутковская и др., 2004). Как следствие, удалось на единой концептуальной основе построить комплекс разнообразных моделей, позволяющих находить оптимальные оценки и решения.

Наиболее сложным для подгонки из рыбопромысловых моделей всегда был когортный анализ в силу большого числа содержащихся в нем параметров. Например, широко применяемый виртуально-популяционный анализ вообще не дает оптимальных оценок (Михеев, 1991, 1991а). Вместе с тем когортный анализ максимально детально – на уровне отдельных поколений – описывает убыль запаса под влиянием естественной смертности и промысла и является базовым математическим методом оценки обилия гидробионтов. Современные подходы к когортному анализу включают моделирование роста,

воспроизводства и других процессов жизненного цикла и практически смыкаются с продукционными моделями.

На **рисунке 1** показаны принципы работы когортной модели СКАП.

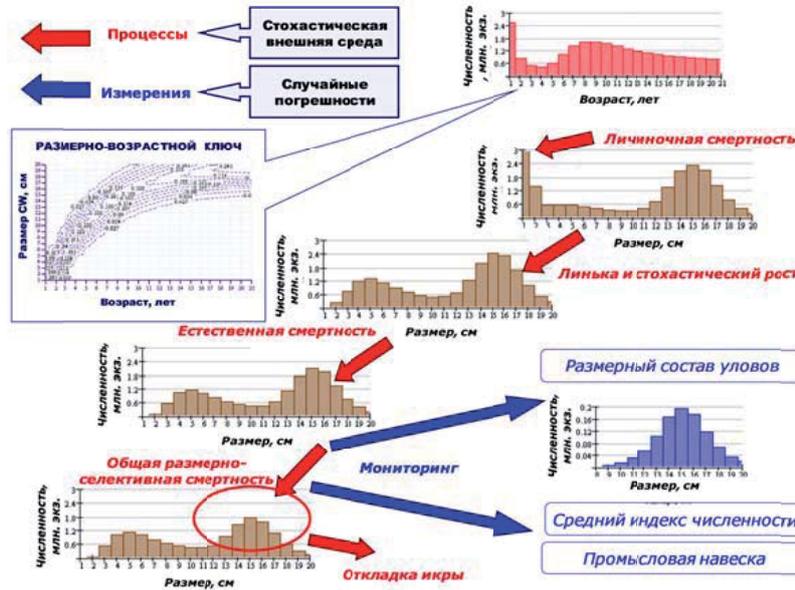


Рис. 1. Изменение размерно-возрастной структуры в годовом жизненном цикле эксплуатируемой популяции беспозвоночных с прерывистым ростом в модели СКАП

Fig. 1. A size-age structural change in the year life cycle of the exploited invertebrate population with the discrete growth in the model of Stochastic Cohort Analysis of Processes (SCAP)

Моделируемые процессы жизненного цикла и промысел определяют в модели размерную структуру запаса. Поколения в запасе выделяются в модели через размерно-возрастной ключ. Биомасса размерных когорт вычисляется с помощью аллометрической зависимости «длина–вес». В биологические процессы включен внешний стохастический шум, а наблюдаемые данные содержат случайные ошибки измерений.

В последней версии модели СКАП заложены возможности использовать данные учетных съемок, экспертно определять вес каждого источника информации, устанавливать ориентиры управления и оценивать риски пересечения граничных ориентиров при различных сценариях развития промысла.

Схема расчетов при подготовке прогнозов ОДУ и пример сценарного моделирования с применением рассматриваемой модели представлены на **рисунках 2 и 3** соответственно.



Рис. 2. Схема построения прогноза допустимого улова на основе модели СКАП
Fig. 2. A scheme of building a forecast for admissible catch based on the SCAP model

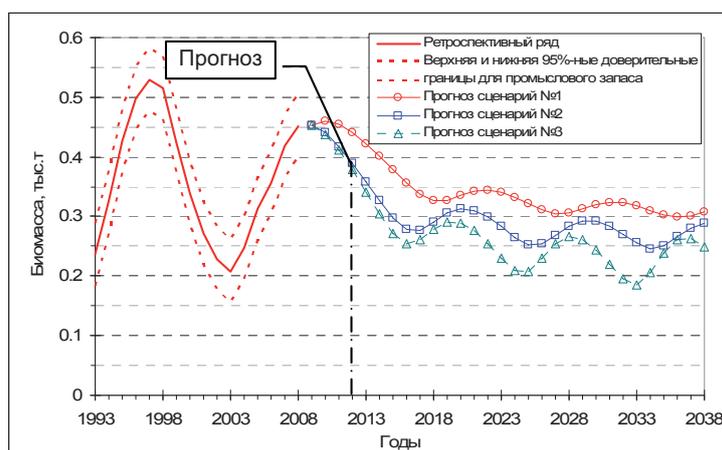


Рис. 3. Динамика промысловой биомассы синего краба на восточном шельфе о. Сахалин в период наблюдений 1993–2008 гг. и прогноз на перспективу 30 лет при различных сценариях промысла по результатам модели СКАП

Fig. 3. Dynamics of commercial biomass of the blue king crab on the eastern Sakhalin shelf during observations in 1993–2008 and a forecast for 30 years under different fishery scenarios resulted from the SCAP model

Следует отметить, что модель СКАП может использоваться не только как оценочная – для реконструкции ретроспективной динамики запаса и определения ориентиров управления, но и как имитационная – для прогнозирования запаса с заданной заблаговременностью (см. рис. 2).

С помощью модели СКАП установлено, что популяциям беспозвоночных с планктонной личиночной стадией свойственно откликаться на рост промысловой нагрузки не только падением промысловой биомассы, но и увеличением частоты и амплитуды ее колебаний, что является негативным фактором для стабильности промысла (см. рис. 3).

Еще одна оценочная модель (ОМЛ ФК) лежит в основе известного метода полигонов. Этот метод позволяет оценить локальный запас по данным о производительности промысла. На **рисунке 4** схематично показаны основные факторы, определяющие изменение локального запаса на полигоне.

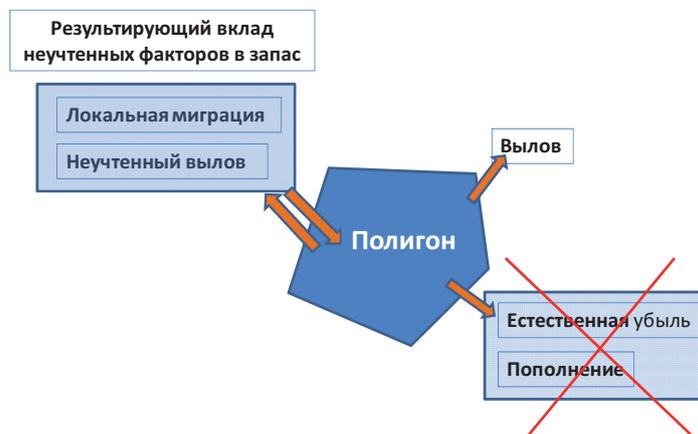


Рис. 4. Схема баланса факторов, влияющих на динамику локального запаса на полигоне, в модели ОМЛ ФК

Fig. 4. Balance of factors affecting the dynamics of local stock on the polygon in the Leslie's Generalized Model with Kalman filter (GLM KF)

Поскольку рассматриваемый для полигона период времени по отношению к годовому циклу достаточно мал, а интенсивность изъятия высока, пополнением и естественной убылью в названной модели пренебрегается. Обобщение классической модели Лесли было осуществлено за счет введения дополнительных факторов, оказывающих влияние на динамику локального запаса, – миграций относительно полигона и дополнительного неизвестного вылова. Следует отметить, что для малочисленных беспозвоночных метод полигонов является едва ли не единственной возможностью оценить запас, поскольку сетки учетных станций становятся для них чересчур редкими (Михеев и др., 2007).

Для оценки запаса по наблюдаемым уловам на усилии в модели ОМЛ ФК был использован фильтр Калмана. Его отличительной чертой является способность по текущему наблюдению корректировать прогноз. Другое важное преимущество названного фильтра перед регрессионным анализом, применяемым в классической модели Лесли, заключается в возможности оценить погрешность измерений. Именно эти особенности фильтра Калмана позволили выполнить обобщение модели Лесли на случай открытых, в частности мигрирующих запасов. В основе данного фильтра лежит итерационная процедура, показанная на **рисунке 5**.

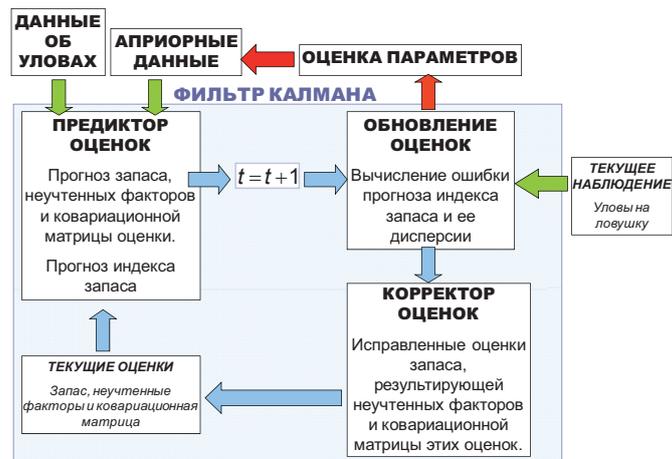


Рис. 5. Схематическое представление итерационного шага алгоритма фильтра Калмана для модели ОМЛ ФК, t – дискретное модельное время, как правило, 1 сутки

Fig. 5. A schematic presentation of iterative step of algorithm of the Kalman filter for GLM KF model, t – discrete model time (as a rule 24 hours)

Пример применения указанной процедуры к реальным промысловым данным показан на **рисунке 6.**

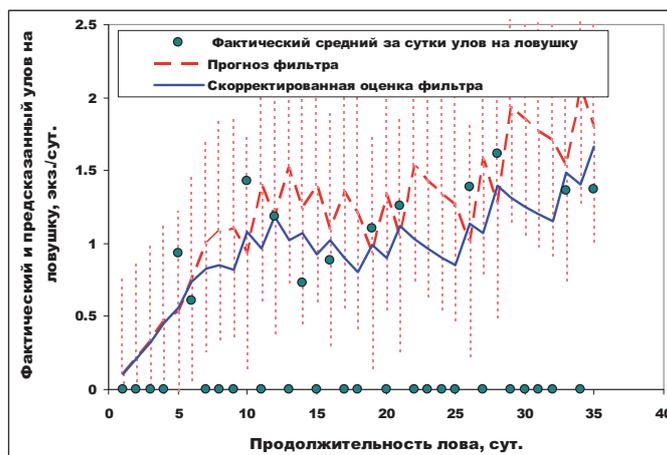


Рис. 6. Прогнозируемые и отфильтрованные ряды оценок индекса запаса на фоне фактических значений среднесуточных уловов на ловушку на примере четырехугольного волосатого краба Татарского пролива, апрель–май 2002 г.; по результатам модели ОМЛ ФК

Fig. 6. Forecasted and filtered series of estimates of stock index against a background of factual values of the mean daily catches per trap on the example of horsehair crab of the Tatar Strait, April–May 2002; from the results of the GLM KF model

Оценка индекса запаса в фильтре Калмана состоит из взвешенной суммы прогнозируемого и фактического значений, а веса определены из условия статистической эффективности этой оценки. При этом оценка всегда располагается между прогнозом и фактом, а сама позиция обратно пропорциональна этим весам (см. рис. 6). Отсюда следует, что если вес прогноза больше, чем вес наблюдения, то оценка будет располагаться ближе к модельному значению. В противном случае, на оценку будут больше влиять фактические данные. Компьютерная программа, реализующая названную модель, позволяет легко вычислить указанные веса и тем самым оценить адекватность модели по отношению к используемым данным.

Модель МПДЛ была построена для того, чтобы оценивать такие параметры промыслового действия ловушек, как коэффициент уловистости и площадь облова. Актуальность этих параметров заключается в том, что они позволяют рассчитывать абсолютную численность или биомассу запаса по соответствующим индексам. Названная модель способна имитировать распространение запаха от приманок, расположенных в произвольной конфигурации, и поведение донных животных в окрестности этих приманок.

В распоряжении исследователей имеется компьютерная программа для быстрого построения шлейфов запаха и пространственного распределения животных разнообразного вида. В качестве примера на **рисунке 7Б** показано пятнистое распределение с равномерно случайным размещением центров пятен и случайным нормальным распределением животных внутри пятен.

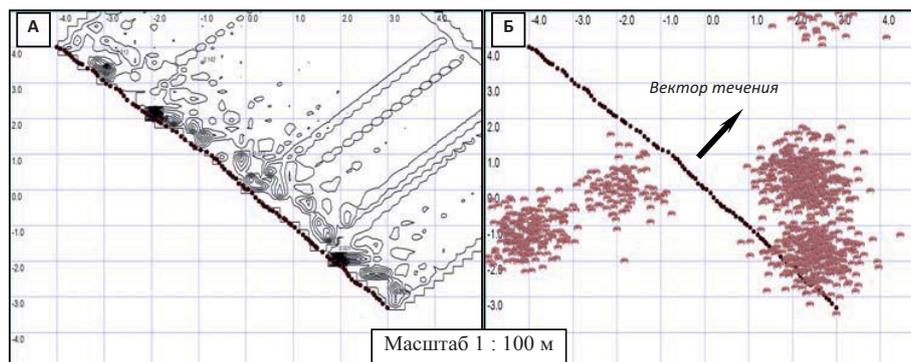


Рис. 7. Пример вычислительного эксперимента на основе модели МПДЛ: (А) шлейф запаха от приманок при скорости течения 20 см/с; (Б) агрегированное пространственное распределение донных животных в окрестности порядка из 100 ловушек

Fig. 7. An example of computing experiment based on the Model of Fishing Activity of Trap (MFAT): (A) tail of a bait smell at the current velocity of 20 cm/s; (B) aggregated spatial distribution of bottom animals around the array of 100 traps

Современные средства объектного программирования позволили в процессе моделирования задавать каждой особи пол, размер и трофическую активность. С помощью модели МПДЛ было исследовано влияние течений на наполнение ловушек. Один из полученных результатов демонстрирует **рисунком 8.**

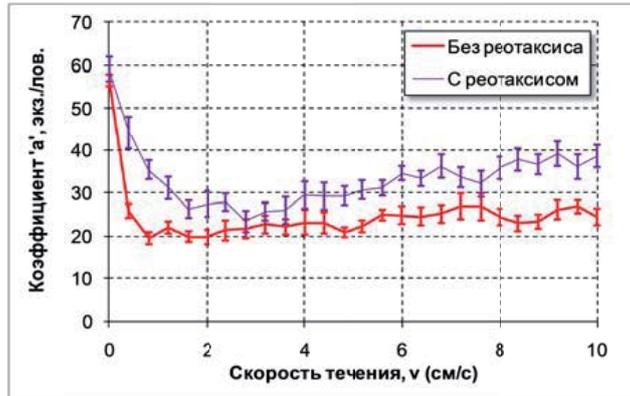


Рис. 8. Зависимость максимального числа прибытий животных к приманке (a) от скорости течения и наличия реотаксиса при поиске по результатам вычислительного эксперимента с применением МПДЛ; показаны 95%-ные доверительные интервалы

Fig. 8. Dependence of maximal number of animals' arrivals to a bait (a) on the current velocity and occurrence of rheotaxis when searching by the results of the computing experiment using MPDL; the 95% confidential intervals are shown

Оказалось, что в потоке использование реотаксиса в сочетании с хемотаксисом дает животным преимущество в поиске приманки (см. рис. 8) и, таким образом, положительно влияет на уловистость ловушек.

Вместе с тем, как демонстрирует **рисунок 9**, площадь так называемого эффективного облова, а следовательно, и уловистость ловушек, заметно возрастает с увеличением скорости течения в случае агрегированных скоплений животных по сравнению с равномерным случайным распределением.

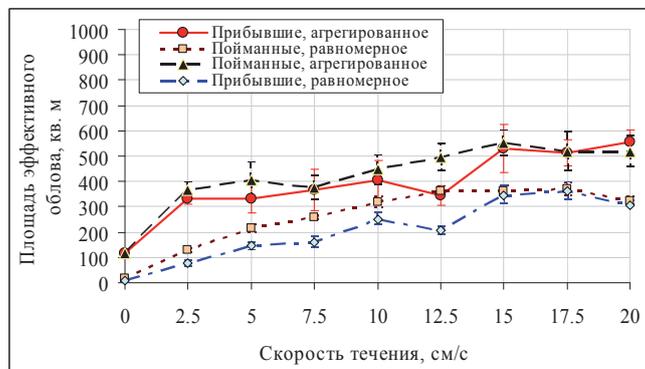


Рис. 9. Зависимость характеристик промыслового действия ловушки в порядке из 100 ловушек от скорости течения и типа пространственного распределения животных при двух способах расчета модели МПДЛ; показаны 95%-ные доверительные интервалы оценок

Fig. 9. Dependence of characteristics of a trap fishing activity in the array of 100 traps on the current velocity and type of spatial distribution of animals using two ways of calculation of the MPDL model; the 95% confidential intervals of estimates are shown

Как известно, для многих промысловых видов беспозвоночных проблема определения возраста особенно остра. Модель СВР предназначена для детерминации возрастного состава в уловах по размерным рядам на основе SEM-подобного алгоритма разделения смеси вероятностных распределений. Названную модель тестировали на сгенерированных размерных рядах.

На **рисунке 10** показан результат тестирования модели СВР.

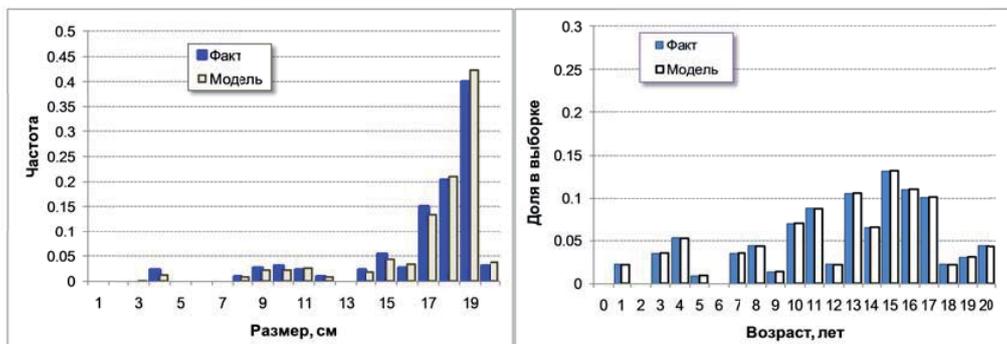


Рис. 10. Размерные и возрастные ряды, сгенерированные на компьютере (факт) и по результатам модели СВР (модель)

Fig. 10. Size and age series from computer generation (fact) and from the Mixture of Probabilistic Distribution (MPD) results (model)

Приложение модели СВР к беспозвоночным с определимым возрастом позволило установить, что на результат детерминации возрастного состава влияет группировка исходного размерного ряда. На **рисунке 11** показано, что при классовом интервале 1 см вариационного размерного ряда результат разделения смеси заметно улучшается, особенно в правой области, где перекрытие возрастных классов по размерам сильнее.

Моделирование светлого гребешка, для которого экспериментально установлен рост логистического типа, показало, что небольшие отклонения в законе роста от уравнения Бергаланфи не оказывают сильного влияния на положительный результат детерминации возрастного состава по размерному ряду.

Исследование кривых роста для беспозвоночных с неизвестным возрастом, выполненное с помощью модели СВР, выявило стабильность характеристик роста в многолетнем аспекте. На **рисунке 12** видно, что рассматриваемые кривые распались на две ветви.

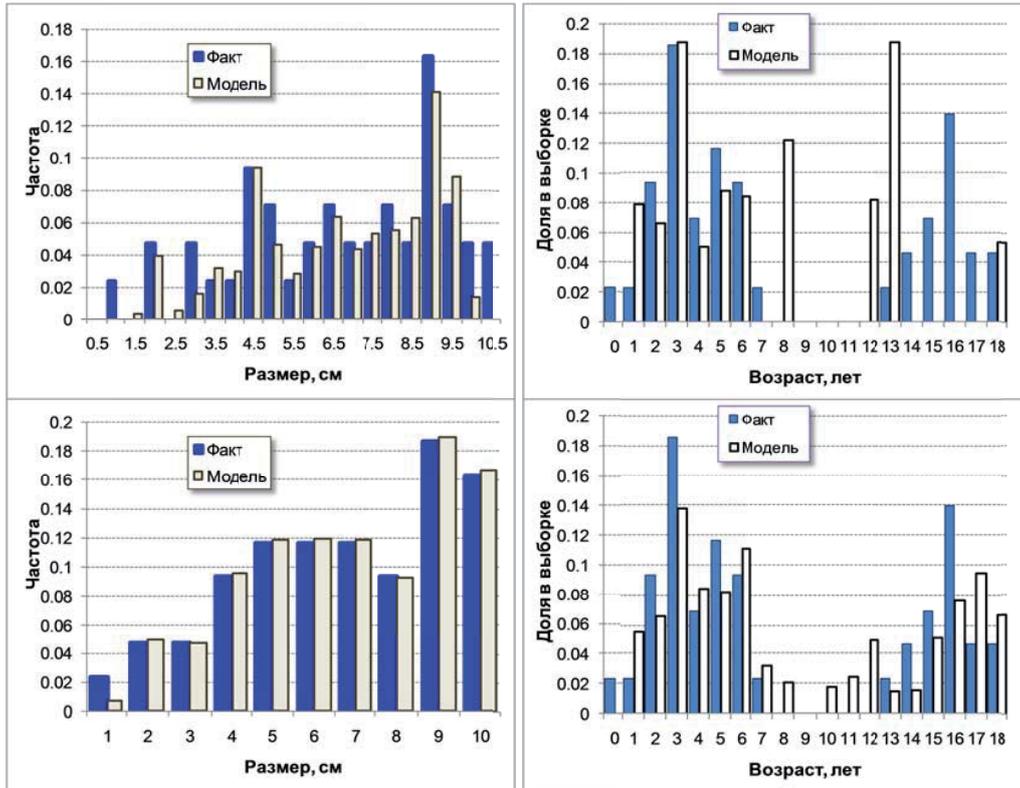


Рис. 11. Возрастной и размерный состав улова светлого гребешка на станции № 22, о. Онекотан, Северные Курилы, 1999 г.; по результатам измерений и работы модели СВР при группировке размерного ряда с интервалом 0,5 см (вверху) и 1,0 см (внизу)

Fig. 11. Age and size composition of light scallop catches at station № 22, Onokotan Island, northern Kuril Islands, 1999 ; from the results of measurements and MPD model when grouping a size series with the interval of 0.5 cm (top) and 1.0 cm (bottom)

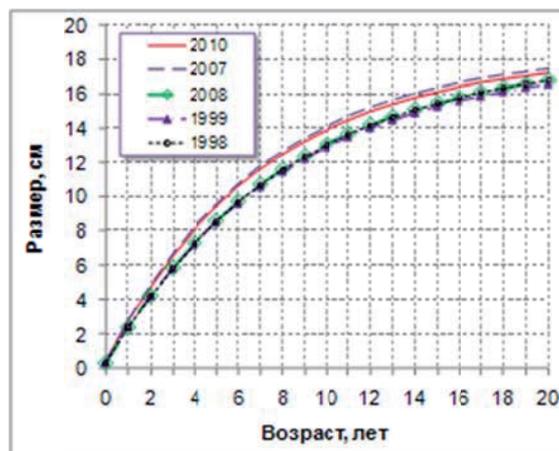


Рис. 12. Кривые роста синего краба на восточном шельфе о. Сахалин в отдельные годы в период 1998–2010 гг.; по результатам работы модели СВР

Fig. 12. Growth curves for blue king crab on the eastern Sakhalin shelf in individual years for 1998–2010; from the results of MPD modeling

Как было выяснено, верхняя ветвь просто включала годы с нерепрезентативными данными, что можно видеть из **таблицы 1**.

Таблица 1

Основные характеристики размерных рядов из уловов синего краба на восточном шельфе о. Сахалин в отдельные годы в период 1998–2010 гг.

Table 1

Basic characteristics of size series from blue king crab catches on the eastern Sakhalin shelf in individual years for 1998–2010

Годы	1998	1999	2007	2008	2010
Период работ	26.09–29.11	31.10–22.12	07.10–01.11	12.10–22.12	16–28.05
Среднее по выборке, см	12,42	12,51	8,60	11,81	14,42
Ст. ошибка по выборке	0,068	0,049	0,135	0,039	0,097
Объем выборки	955	1 440	209	2 199	250

Объемы выборок и стандартные ошибки в указанные годы резко отличаются от аналогичных значений в остальные годы. Данное обстоятельство легко объяснимо тем, что в 2007 г. район сбора данных был нетрадиционным и была обловлена преимущественно молодежь, а в случае 2010 г. сроки сбора данных были нестандартными (см. табл. 1).

Статистический анализ, выполненный для рассматриваемых данных, показал, что отмеченное различие в кривых роста связано только с одним параметром – коэффициентом Броуди из уравнения Берталанфи. Вывод о достоверности различий в параметрах между двумя группами лет легко сделать по приведенным в **таблице 2** оценкам средних и стандартных отклонений в соответствующих размерных рядах.

Таблица 2

Параметры кривых роста Берталанфи для синего краба на восточном шельфе о. Сахалин в отдельные годы в период 1998–2010 гг.

Table 2

Parameters of curves from the Bertalanffy's law of growth for blue king crab on the eastern Sakhalin shelf in individual years for 1998–2010

Годы	K , 1/год	L_{∞} , см	a_0 , лет	σ_0 , см
1998	0,122263185	18,33304775	-0,14774013	0,304760897
1999	0,123275974	18,06232512	-0,14809538	0,300010622
2007	0,141019703	18,56250012	-0,14829706	0,300683987
2008	0,12342011	18,28390694	-0,13639672	0,416174507
2010	0,140445199	18,30361903	-0,14983086	0,247078502
Среднее, 98, 99, 08	0,122986423	18,2264266	-0,14407741	0,340315342
Ст. отклонение	0,000630475	0,144224398	0,00665404	0,065738885
Среднее, 07, 10	0,140732451	18,43305957	-0,14906396	0,273881245
Ст. отклонение	0,000406236	0,183056576	0,00108456	0,037904802
Среднее, 98-10	0,130084834	18,30907979	-0,14607203	0,313741703
Ст. отклонение	0,009732238	0,177727098	0,00546735	0,062000329

На рисунке 13 продемонстрированы прогнозы и оценки подходов горбуши из основного района промысла, полученные с помощью модели НМР ФК.

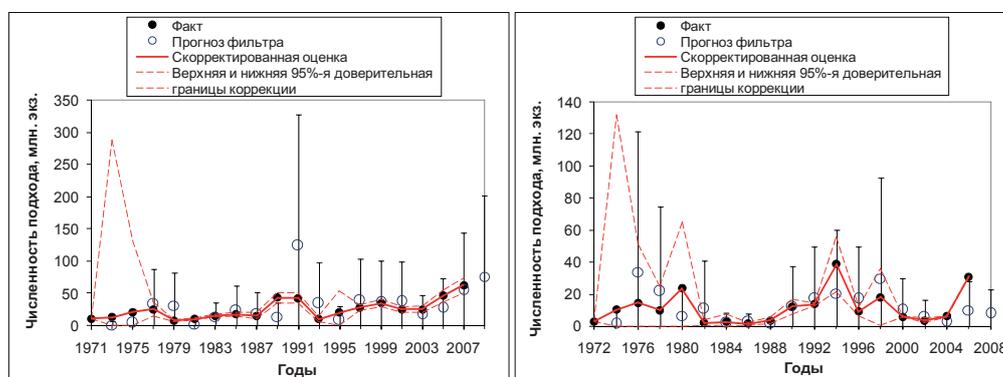


Рис. 13. Фактические и прогнозируемые с помощью модели НМР ФК подходы горбуши на юго-восточном побережье о. Сахалин для поколений четных (справа) и нечетных (слева) лет

Fig. 13. Factual pink salmon approaches on the southeastern coast of Sakhalin Island and those forecasted with the help of the Nonlinear Ricker Model with Kalman filter (NRM KF) for even (right) and odd (left) year broods

В качестве ненаблюдаемых переменных для фильтра Калмана в рассматриваемой модели послужили коэффициент репродукции и показатель емкости среды. Связь этих переменных с наблюдаемой численностью подходов горбуши осуществлена с помощью известной модели Рикера. Влияние внешней среды на численность горбуши моделировали как случайный шум в коэффициенте репродукции и марковский процесс для емкости среды. Шум имитировал влияние плохо учитываемых факторов регионального масштаба, а марковский процесс представлял глобальные климатические тренды.

Сегодня работы по математическому моделированию в СахНИРО ведутся в русле новых тенденций, наметившихся в данной области в последнее десятилетие. Современное управление водными биоресурсами базируется на сочетании трех основных подходов: экосистемного, мультииндикаторного и зонального. Экосистемный подход является для мировой рыбохозяйственной науки чрезвычайно сложным и далеким от реализации (Rothschild, Beamish, 2009). Главная проблема здесь заключается в неравномерной обеспеченности данными всех элементов и потоков в морских экосистемах. Преимущественно изучены верхние – эксплуатируемые человеком – трофические уровни. Многомерность структуры экосистемы осложняет и без того непростую задачу в выявлении ведущих механизмов ее функционирования. Мультииндикаторный анализ возник как одна из перспективных разработок, предваряющих решение указанной проблемы и способствующих развитию экосистемного подхода (Halliday et al., 2001). Ключевая идея мультииндикаторного подхода состоит в синтезе наблюдаемой информации о различных аспектах функционирования запаса, в т. ч. экосистемных и социальноэкономических (рис. 14).



Рис. 14. Информационная пирамида в организации данных (по: Pajak, 2000)
 Fig. 14. Information pyramid for managing the data (from: Pajak, 2000)

Для преобразования многомерной информации о состоянии запаса в интегральную характеристику в соответствии с пирамидой Пайджака (см. рис. 14) в СахНИРО был разработан метод на основе теории нечетких логик (Рутковская и др., 2004). В настоящее время свойства данного подхода изучаются, и ряд результатов по этому направлению был представлен на отчетной сессии НТО «ТИНРО» в Хабаровске в 2010 г.

Мультииндикаторный и зональный подходы неразрывно связаны в современной схеме управления запасами. Простейший вариант зонального управления в рыбохозяйственной науке известен как «предосторожный» подход (Caddy, Mahon, 1995; Бабаян, 2000). Выбор индикаторов состояния запаса и ориентиров управления является первоочередным и важнейшим шагом зонального подхода (Caddy, 2002). Исследования в этом направлении ведутся в СахНИРО с 1998 г. (Михеев, 1999а). На **рисунке 15** показан пример зонального управления неким абстрактным запасом.

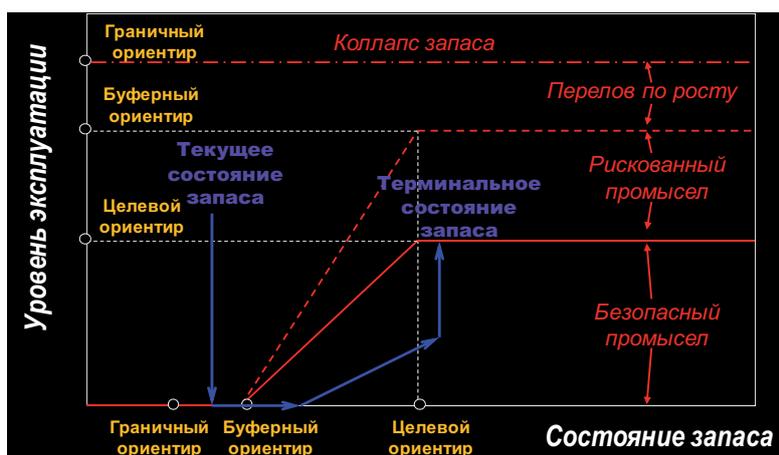


Рис. 15. Диаграмма зонального управления запасом
 Fig. 15. A graph of zonal stock management

Некоторые из рассмотренных выше моделей уже используются при прогнозировании отдельных единиц запаса и в научных исследованиях, другие еще находятся в стадии доработки и проверки на достаточно обширном материале, прежде чем смогут быть применены. Широкого признания они еще не получили по ряду причин, в том числе и по той только что названной. Для массового применения этих моделей требуется подготовить соответствующую документацию, провести обучение, получить заключение управления по науке Росрыболовства.

Созданный в СахНИРО в декабре 2010 г. отдел обеспечения прогнозов включает в себя сектор математического обеспечения прогнозов, предназначенный разрабатывать и использовать методы оценки и прогнозирования запасов на основе математических моделей. Первоочередной задачей отдела на ближайшую перспективу является унификация названных выше моделей и их внедрение в практику рыбохозяйственных исследований. Стратегическая цель работы отдела заключается в том, чтобы сделать математические модели рутинным средством прогнозирования запасов и определения мер регулирования промысла.

Помимо собственно научных проблем, встающих перед исследователями в области математического моделирования рыбохозяйственных задач, имеется и серьезная системная проблема. Она заключается в том, что моделирование сложных систем – дело сугубо междисциплинарное. А то, что популяция, биоценоз и экосистема являются сложными объектами, сомнений не вызывает. Раз так, то нужны специалисты, одинаково компетентные в обеих областях – биологии и математике, либо их долгосрочный «симбиоз». Найти таких специалистов-универсалов практически невозможно, поскольку отечественные вузы их не готовят, и последние представляют собой «штучный товар», формирующийся, как правило, стихийно и в весьма непростых условиях. Организовать творческий союз биологов и математиков на длительной основе, как показывает жизнь, тоже не удастся, а временные коллективы больших результатов, как правило, не дают. Таким образом, решение кадрового вопроса является одной из приоритетных задач отдела обеспечения прогнозов на сегодняшний день.

Другой путь в решении обозначенной проблемы заключается в проведении дополнительного обучения и повышения квалификации биологов по вопросам математического моделирования. Удобной формой такого дополнительного образования является семинар. Продолжая традиции 1980-х, в конце 1990-х гг. в СахНИРО эпизодически проводились тематические семинары по моделированию в рыбохозяйственных исследованиях для сотрудников института. С 2009 г. начато проведение отраслевых семинаров по применению разработанных в СахНИРО математических моделей (**фото 1 и 2**).

Остается надеяться на то, что математическое моделирование как самостоятельный вид исследований в СахНИРО будет востребовано.



Фото 1. Участники отраслевого семинара по теме «Применение обобщенной модели Лесли с фильтром Калмана (ОМЛ ФК) к оценке запасов (метод полигонов)», 26–30 октября 2009 г., Южно-Сахалинск, фойе зала заседаний СахНИРО (слева направо): А. А. Михеев (руководитель семинара, СахНИРО), А. И. Буяновский (ВНИРО), А. Б. Савин (ТИНРО-Центр), И. С. Черниенко (ХфТИНРО), А. Г. Васильев (МагаданНИРО), А. Г. Слизкин (ТИНРО-Центр), А. В. Лысенко (ТИНРО-Центр), П. Ю. Иванов (КамчатНИРО)

Photo 1. Participants of the sectoral seminar on the topic “Application of the generalized Leslie’s model with the Kalman filter (GLM KF) for assessing stocks (polygons’ method)”, 26–30 October 2009, Yuzhno-Sakhalinsk, foyer of assembly hall of SakhNIRO (left to right): A. A. Mikheyev (manager of seminar, SakhNIRO), A. I. Buyanovsky (VNIRO), A. B. Savin (TINRO-Centre), I. S. Chernienko (KhfTINRO), A. G. Vasiliev (MagadanNIRO), A. G. Slizkin (TINRO-Centre), A. V. Lysenko (TINRO-Centre), P. Yu. Ivanov (KamchatNIRO)



Фото 2. Практические занятия по освоению компьютерной программы ОМЛ ФК в рамках отраслевого семинара по теме «Применение обобщенной модели Лесли с фильтром Калмана (ОМЛ ФК) к оценке запасов (метод полигонов)»

Photo 2. Practical training to master computer program GML KF at the sectoral seminar on the topic “Application of the generalized Leslie’s model with the Kalman filter (GLM KF) for assessing stocks (polygons’ method)”

ЛИТЕРАТУРА

- Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 608 с.
- Бабаян, В. К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): анализ и рекомендации по применению [Текст] / В. К. Бабаян. – М. : Изд-во ВНИРО, 2000. – 192 с.
- Баранов, Ф. И. К вопросу о биологических основаниях рыбного хозяйства [Текст] / Ф. И. Баранов // Изв. Отдела рыбоводства науч.-промысловых исследований. – 1918. – Т. 1, № 1. – С. 84–128.
- Баранов, Ф. И. К вопросу о динамике рыбного промысла [Текст] / Ф. И. Баранов // Бюл. рыб. хоз-ва. – 1925. – № 8. – С. 7–11.
- Баранов, Ф. И. Рыболовство и предельный возраст рыб [Текст] / Ф. И. Баранов // Бюл. рыб. хоз-ва. – 1925а. – № 9. – С. 26–27.
- Баранов, Ф. И. О наиболее рентабельном размере рыб [Текст] / Ф. И. Баранов // Бюл. рыб. хоз-ва. – 1925 б. – № 11. – С. 32.
- Баранов, Ф. И. По поводу выступлений профессора П. А. Моисеева и кандидата биологических наук Т. Ф. Дементьевой [Текст] / Ф. И. Баранов // Рыб. хоз-во. – 1956. – № 1. – С. 69–73.
- Ефанов, В. Н. Моделирование запасов и прогноз оптимального улова на примере желтохвостой камбалы [Текст] / В. Н. Ефанов // Тр. АтлантНИРО. – 1976. – Вып. 65. – С. 211–219.
- Ефанов, В. Н. Методика краткосрочного прогнозирования интенсивности подходов горбуши к побережью [Текст] / В. Н. Ефанов, Л. Д. Хоревин, В. М. Чупахин // Биология лососевых : Тез. докл. Междунар. четырехсторон. совещ. (СССР, США, Канада, Япония) (Ю-Сах., окт. 1978 г.). – Владивосток, 1978. – С. 65–67.
- Ефанов, В. Н. Моделирование динамики численности горбуши на разных этапах онтогенеза [Текст] / В. Н. Ефанов, Е. И. Скалецкая // Тез. докл. междунар. симп. по тихоокеан. лососям (Ю-Сах., 9–17 сент. 1989 г.). – Владивосток, 1990. – С. 76–78.
- Зверькова, Л. М. Динамика запаса популяции минтая в северной части Охотского моря (к северу от 50 градуса) и перспективы промысла [Текст] / Л. М. Зверькова, Г. А. Октябрьский // Сб. науч. тр. СахТИНРО «Рыбохоз. исслед. в Сах.-Курил. р-не и сопред. акваториях». – Ю-Сах. : Сах. обл. книж. изд-во, 1994. – С. 15–22.
- Иванова, И. М. Применение метода склеритограмм для дифференциации локальных стад сахалинской горбуши [Текст] / И. М. Иванова, Г. А. Октябрьский // Тез. докл. междунар. симп. по тихоокеан. лососям (Ю-Сах., 9–17 сент. 1989 г.). – Владивосток, 1990. – С. 82–84.
- Каева, В. Е. Теория хода горбуши на нерест [Текст] / В. Е. Каева, Г. А. Октябрьский // Междунар. симп. по тихоокеан. лососям (Ю-Сах., 9–17 сент. 1989 г.) : Тез. докл. – Владивосток, 1990. – С. 85–86.
- Киткин, П. А. Вероятностные методы решения задач промысловости и оптимального использования биоресурсов [Текст] / П. А. Киткин, Ю. А. Колесник, Ю. Я. Краснопольский. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1984. – 127 с.
- Климов, С. М. Уточнение зависимости скат-возврат на примере горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha* Walb.) юго-восточного побережья о-ва Сахалин [Текст] / С. М. Климов, В. Н. Ефанов, А. А. Михеев // Тез. докл. III Всесоюз. науч. конф. по проблемам промыслового прогнозирования (долгосрочные аспекты) (Мурманск, 28–30 окт. 1986 г.). – Мурманск, 1986. – С. 77–78.
- Колесник, Ю. А. Исследование параметров, характеризующих состояние запасов рыб [Текст] : Автореф. дис. ... канд. биол. наук / Ю. А. Колесник. – Владивосток : ТИНРО, 1975. – 22 с.
- Колесник, Ю. А. Методика определения численности самок морских котиков [Текст] / Ю. А. Колесник, В. М. Когай // Мор. млекопитающие Тихого океана. – Владивосток : ТИНРО, 1977. – Вып. 1. – С. 41–45.
- Колесник, Ю. А. Коэффициент выживаемости и вероятность потери меток котиками [Текст] / Ю. А. Колесник, Е. И. Соболевский // Рыб. хоз-во. – 1978. – № 11. – С. 28–29.
- Колесник, Ю. А. Влияние скорости вращения Земли на динамику численности рыб и млекопитающих северо-западной части Тихого океана [Текст] / Ю. А. Колесник, А. А. Тимофеева // Тез. докл. всесоюз. конф. по теории формирования численности и рац. использ. стад промысловых рыб (М., окт. 1982 г.). – М., 1982. – С. 163–165.

- Михеев, А. А.** Обоснование вида кривой пополнения [Текст] / А. А. Михеев // Итоги исслед. по вопр. рац. исполыз. и охраны вод., земел. и биол. ресурсов Сах. и Курил. о-вов : Тез. докл. III науч.-практ. конф. (27–28 марта 1987 г.). – Ю-Сах., 1987. – С. 106–109.
- Михеев, А. А.** Всегда ли можно настроить стартовые коэффициенты промысловой смертности в УРА? [Текст] / А. А. Михеев // Информ. и математ. обеспечение исследований сырьевой базы : Сб. науч. тр. – М. : Изд-во ВНИРО, 1991. – С. 78–92.
- Михеев, А. А.** Аспект устойчивости в методе виртуально-популяционного анализа и потери устойчивости и настройка коэффициентов с использованием временных рядов [Текст] / А. А. Михеев // Информ. и математ. обеспечение исследований сырьевой базы : Сб. науч. тр. – М. : Изд-во ВНИРО, 1991а. – С. 92–102.
- Михеев, А. А.** Хаос и релаксация в динамике возвратов горбуши *O. gorbuscha* двух районов [Текст] / А. А. Михеев // Изв. ТИНРО. – 1996. – Т. 116. – С. 207–214.
- Михеев, А. А.** Исследование пространственной неоднородности абиотической среды на северо-восточном шельфе о. Сахалин: многомерный статистический анализ [Текст] / А. А. Михеев // Изв. ТИНРО. – 1999. – Т. 126, ч. II. – С. 603–627.
- Михеев, А. А.** Расчет оптимального изъятия донных беспозвоночных [Текст] / А. А. Михеев // Рыб. хоз-во. – 1999а. – № 5. – С. 41–43.
- Михеев, А. А.** Определение промысловых параметров крабовых ловушек с помощью математической модели «хищник–приманка» [Текст] / А. А. Михеев // Вопр. рыболовства. – 2001. – Т. 2, № 3. – С. 518–541.
- Михеев, А. А.** Стохастическая когортная модель для беспозвоночных с прерывистым ростом [Текст] / А. А. Михеев // Тр. СахНИРО. – 2003. – Т. 5. – С. 216–242.
- Михеев, А. А.** Моделирование стохастических процессов в эксплуатируемых популяциях рыб и беспозвоночных (на примере горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* и синего краба *Paralithodes platypus* восточного шельфа Сахалина) [Текст] : Автореф. дис. ... канд. биол. наук / А. А. Михеев; МГУ. – Ю-Сах. : СахНИРО, 2004. – 24 с.
- Михеев, А. А.** Применение фильтра Калмана к модели Риккера «запас–пополнение» [Текст] / А. А. Михеев // Тез. докл. семинара «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана» (Владивосток, 14–17 сент. 2004 г., ТИНРО-Центр). – Владивосток : Изд-во ТИНРО, 2004а. – С. 29–32.
- Михеев, А. А.** Применение обобщенного фильтра Калмана к прогнозированию возвратов горбуши [Текст] / А. А. Михеев // Изв. ТИНРО. – 2006. – Т. 145. – С. 146–167.
- Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006612785 «Используемый модуль Genetic Optimum ver. 1.0» / зарегистрировано 04.08.2006; **Ф. А. Михеев, Г. Д. Дмитриевич, В. А. Павлушин, М. В. Марков** // Офиц. бюл. ФИПС «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». – 2006. – № 3.
- Михеев, А. А. Новая версия компьютерной программы для обобщенной модели Лесли с фильтром Калмана [Текст] / А. А. Михеев, Ф. А. Михеев // Тез. докл. семинара «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана» (1–3 окт. 2007 г., ТИНРО-Центр). – Владивосток : Изд-во ТИНРО, 2007. – С. 17–18.
- К проблеме учета промысловых беспозвоночных в популяциях с низким уровнем численности / **А. А. Михеев, С. Д. Букин, Е. Р. Первеева и др.** // Сб. науч. тр. «Морские промысловые беспозвоночные и водоросли: биология и промысел». К 70-летию со дня рождения Б. Г. Иванова : Тр. ВНИРО. – М. : Изд-во ВНИРО, 2007. – Т. 147. – С. 27–38.
- Михеев, А. А. Влияние течений на промысловую активность ловушек: предварительные результаты вычислительного эксперимента [Текст] / **А. А. Михеев, Ф. А. Михеев** // Тр. СахНИРО. – 2008. – Т. 10. – С. 35–56.
- Михеев, А. А.** Стохастический когортный анализ процессов: новая модель для рыбопромыслового прогнозирования [Текст] / А. А. Михеев // Тез. докл. X Всерос. конф. по проблемам рыбопром. прогнозирования (Мурманск, 6–8 окт. 2009 г.). – Мурманск : Изд-во ПИНРО, 2009. – С. 94–96.
- Михеев, А. А. Запасы колючего краба (*Paralithodes brevipes*) на восточном шельфе о. Сахалин: оценка с применением метода полигонов [Текст] / **А. А. Михеев, А. А. Кругченко, А. И. Пьянов** // Тр. СахНИРО. – 2010. – Т. 11. – С. 49–61.

- Михеев, А. А.** Возрастная детерминация размерного состава улова на основе разделения смеси вероятностных распределений [Текст] / А. А. Михеев // Исслед. вод. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. – 2011. – № 22. – С. 79–92.
- Оценка запасов беспозвоночных в Сахалино-Курильском районе на основе анализа временных рядов уловов с применением фильтра Калмана [Текст] / А. А. Михеев, С. Д. Букин, Е. Р. Первеева и др. // Изв. ТИНРО. – 2012. – Т. 168. – С. 99–120.
- Михеев, А. А.** Влияние реотаксиса на поиск приманки донными животными: вычислительный эксперимент [Текст] / А. А. Михеев // Журн. общ. биологии. – В печати.
- Октябрьский, Г. А.** Базис популяционных данных (БПД) для решения задач сырьевого прогнозирования [Текст] / Г. А. Октябрьский // Информ. и математ. обеспечение исслед. сырьевой базы. – М. : ВНИРО, 1991. – С. 103–110.
- Октябрьский, Г. А. Аукцион урожая на корню рыбных запасов [Текст] / Г. А. Октябрьский, В. А. Снытко // Северо-Восток России: проблемы экономики и народонаселения. Расширенные тез. докл. региональной науч. конф. «Северо-Восток России: прошлое, настоящее, будущее» (Магадан, 31 марта – 2 апр. 1998 г.). – Магадан, 1998. – Т. I. – С. 70.
- Октябрьский, Г. А. Согласованные параметры структурного роста дальневосточной сардины [Текст] / Г. А. Октябрьский, Г. В. Швыдкий // Изв. ТИНРО. – 2000. – Т. 127, ч. 1. – С. 209–217.
- Рихтер, В. А. Об одном из подходов к оценке естественной смертности рыбных популяций [Текст] / В. А. Рихтер, В. Н. Ефанов // Тр. АтлантНИРО. – 1977. – Вып. 73. – С. 77–85.
- Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
- Caddy, J. F.** Reference points for fisheries management [Text] / J. F. Caddy, R. Mahon // FAO Fish. Tech. Pap. – 1995. – No. 347. – 83 p.
- Caddy, J. F.** Viewpoint: limit reference points, traffic lights, and holistic approaches to fisheries management with minimal stock assessment input [Text] / J. F. Caddy // Fish. Res. – 2002. – Vol. 56. – P. 133–137.
- Halliday, R. G. Use of the Traffic Light Method in fishery management planning [Text] / R. G. Halliday, L. P. Fanning, R. K. Mohn // Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Res. Doc. – 2001. – No. 108. – 41 p.
- Mikheyev, A.** Chaos and relaxation in dynamics of the pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) returns for two regions [Text] / A. Mikheyev // Proc. of the Workshop on the Okhotsk Sea and adjacent areas, Sidney (Canada): PICES Sci. Rep. – 1996. – No. 6. – P. 356–362.
- Pajak, P.** Sustainability, ecosystem management and indicators: Thinking globally and acting locally in the 21st century [Text] / P. Pajak // Fisheries. – 2000. – Vol. 25, No. 12. – P. 16–30.
- Perry, I. R. A framework for providing scientific advice for the management of new and development invertebrate fisheries [Text] / I. R. Perry, C. J. Walters, J. A. Boutillier // Rev. Fish Biol. Fish. – 1999. – Vol. 9. – P. 125–150.
- Rothschild, B. J. On the Future of Fisheries Science [Text] / B. J. Rothschild, R. J. Beamish // The future of fisheries science in North America, Fish & Fisheries Series, Springer Science + Business Media B. V. – 2009. – Vol. 31. – P. 1–13.
- Saila, S. B.** Guide to some computerized artificial intelligence methods [Text] / S. B. Saila // Computers in fisheries research. – Chapman and Hall, London, 1996. – P. 8–40.
- Schnute, J. T.** A general framework for developing sequential fisheries models [Text] / J. T. Schnute // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 1994. – Vol. 51. – P. 1676–1688.
- Schnute, J. T. Use and abuse of fishery models [Text] / J. T. Schnute, L. J. Richards // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 2001. – Vol. 58. – P. 1–8.