

Рисунки, коп

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

*Судноуважаемому
Анатолию Алексеевичу
Емурафову
автора*

*ЛН
9.12.93*

На правах рукописи

БОЧАРОВ Лев Николаевич

УДК 573.22.087.1.001.57.
639.2.053.8

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КРАТКОСРОЧНОГО
ПРОМЫСЛОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Специальность 05.13.16.

Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных
исследованиях (в отраслях технических наук)

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени доктора
технических наук в форме научного доклада

Владивосток - 1993

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

На правах рукописи

БОЧАРОВ Лев Николаевич

УДК 573.22.087.1.001.57.
639.2.053.8

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КРАТКОСРОЧНОГО
ПРОМЫСЛОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Специальность 05.13.16.

Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных
исследованиях (в отраслях технических наук)

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени доктора
технических наук в форме научного доклада

Владивосток - 1993

Работа выполнена в Тихоокеанском научно-исследовательском институте рыбного хозяйства и океанографии

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Г.Я.Волошин

д.ф.-м.н., профессор В.В.Юдин

д.ф.-м.н. С.М.Зуев

Ведущая организация: Вычислительный центр РАН

Защита состоится "___" _____ 1994 г. в _____ часов на заседании Специализированного совета Д 003. 30. 01 при Институте автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу:

690041, г.Владивосток 41, ул. Радио 5.

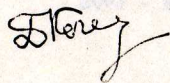
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН.

Доклад разослан "10" декабря 1993 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета,

к.т.н.



Б.И.Коган

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Более 90% мировой продукции рыбного хозяйства в настоящее время приходится на морские и океанические промыслы. В рыбной отрасли России ведущую роль играют морские биологические ресурсы дальневосточного бассейна. Их освоенная часть, являющаяся сырьевой базой рыбной промышленности Дальнего Востока, дает ныне 60 % общероссийского вылова.

Рациональное использование возобновляемых морских биологических ресурсов включает в себя как важнейшую составляющую освоение оптимально допустимых объемов вылова различных объектов промысла с минимальными затратами добывающего флота. Следует отметить, что доля потерь промыслового времени на поиск рыбных скоплений до сих пор чрезмерно велика и достигает порою 30-40%. Основой решения задач, направленных на повышение эффективности работы добывающего флота, таких как оптимизация объемов промысловых усилий, сокращение непроизводительных затрат промыслового времени, сглаживание сезонности морских промыслов, являются надежные прогнозы промысловой обстановки. Особую остроту эта проблема приобрела в последние 20-25 лет, когда сложилась практика работы крупными рыбодобывающими экспедициями. Причем по мере совершенствования добывающий флот становится все более дорогим и, следовательно, значимость проблем его эффективного использования и краткосрочного прогнозирования промысловой обстановки (КППО) будет возрастать. В первую очередь это относится к промыслам пелагических объектов, таких как сайра, сардина, сельдь, кальмары и др.

До исследований, выполненных в представленной работе, в нашей стране и за рубежом отсутствовали теоретические концепции, апробированные методы исследований, специализированное программное обеспечение и обоснованная практика прогнозирования промысловой обстановки, хотя и существовали отдельные, в основном экспертные, приемы этого дела. Актуальность работы обусловлена решением именно этого круга принципиальных вопросов краткосрочного промыслового прогнозирования. Это комплексное исследование, рассматривающее задачи научно-методического, технического, организационного и информационного обеспечения КППО. Таким подходом к проблеме достигается объединение результатов теоретического моделирования и натуральных экспериментов, а также их практического использования.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка, реализация и экспериментальная проверка концепции краткосрочного рыбопромышленного прогнозирования на базе системного анализа проблемы и возникающей в его рамках человеко-машинной информационной технологии. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

- проблемно-целевой анализ рыбопромышленного прогнозирования;
- разработка методов описания состояния системы "окружающая среда-промышленный объект" для целей прогнозирования промышленной обстановки;
- разработка адаптивной схемы идентификации и обучения математических моделей краткосрочного прогнозирования промышленной обстановки;
- усовершенствование и исследование адекватности моделей распознавания образов, различных регрессионных моделей, а также разработка и исследование ряда оригинальных моделей для КППО;
- обоснование принципа выработки прогнозных решений на основе комитета моделей;
- разработка и апробация методов количественной оценки качества прогнозов промышленной обстановки;
- разработка человеко-машинной технологии сбора, обработки и анализа применяемых в промышленном прогнозировании данных (промышленных, океанологических, как судовых, так и дистанционных, гидроакустических и др.);
- разработка и реализация в виде компьютерной диалоговой системы программного обеспечения для всех этапов прогнозирования промышленной обстановки;
- экспериментальная и практическая проверка разработанной системы в реальных условиях рыбных промыслов дальневосточного бассейна, сравнительный анализ результатов на основе судового и дистанционного зондирования океана.

Научная новизна. В работе развито новое научное направление, связанное с комплексным решением задач анализа и прогнозирования состояний системы "окружающая среда - морские биологические объекты промысла".

На основе проведенных исследований предложена единая концепция теоретического моделирования процессов формирования и динамики

перспективных районов рыбного промысла. На этой основе разработана адаптивная схема идентификации моделей и обосновано применение принципа комитета таких моделей для КППО. Впервые разработаны и использованы интегральные показатели состояния внешней среды, количественные оценки качества прогнозов промышленной обстановки, ряд математических моделей (распознавания и регрессионная с интегральным показателем, градиентная, диффузионная, энтропийная и др.) для решения основных задач КППО.

Программная реализация этих разработок выполнена в виде диалоговой системы (СОРПУ), имеющей две версии: для персональных компьютеров типа IBM XT/AT и для мини-ЭВМ СМ-1420. Эта программная система не имеет аналогов ни в России, ни за рубежом. Таким образом, на основе системного анализа проблемы создана информационная человеко-машинная технология краткосрочного промышленного прогнозирования.

В процессе ее создания и опытной эксплуатации в береговых и морских условиях получены и проанализированы количественные оценки информативности различных параметров состояния среды для рыбопромышленных целей, точности дистанционных измерений температуры океана, качества промышленных прогнозов по различным моделям, периода действия инерционных прогнозов и т.д.

Практическая ценность работы определяется тем, что в ней впервые рассмотрена вся проблема краткосрочного прогнозирования промышленной обстановки от теоретической постановки задач до апробации результатов исследований и разработок в условиях реальных промыслов. Предложенные подходы и методики обоснованы как теоретически, так и практически. Надежные прогнозы промышленной обстановки не только дают большую экономию промышленного времени за счет сокращения времени поиска промысловых скоплений, но и служат основой оперативного управления рыбодобывающим флотом. При этом следует иметь в виду, что суточный вылов крупных промысловых экспедиций составляет тысячи тонн рыбы.

Информационной базой предложенной технологии являются все доступные и уже в той или иной мере используемые в практике промысла данные научно-исследовательских и поисковых судов, добывающего флота, самолетов авиаразведки, спутников. Это позволяет использовать существующие системы организации управления и телекоммуникаций. Практически ценно и то, что опыт высококвалифицированных специалистов по прогнозированию и поиску рыбных скоплений не противопоставляется компьютерной технологии, а интегрируется ею за счет ее способности к адаптации и обучению. Таким образом, развиваемое в диссертации научное

направление (промысловая информатика) соединяет теорию и практику краткосрочного промыслового прогнозирования.

Результаты и разработки диссертации в течение ряда лет применялись в ТИНРО для практического обеспечения рекомендациями о промысловой обстановке япономорского и южнокурильского промыслов сардины и промысла сайры в районе Южных Курил. На практике подтверждено высокое качество краткосрочных промысловых прогнозов на основе предложенной человеко-машинной технологии. В среднем около трех четвертей вылова приходится на рекомендованные участки промысловой акватории. Причем этот результат носит стабильный характер.

Большое практическое значение имеет использование разработанной компьютерной системы в качестве тренажера для специалистов по управлению морским промыслом. Разработанная информационная технология оказалась также мощным средством исследования процессов формирования и динамики промысловой обстановки под воздействием окружающей среды. Соответствующие разработки диссертации, в частности СОРПУ, были внедрены в Государственном производственном объединении "Дальрыба", в Тихоокеанском управлении промысловой разведки и научно-исследовательского флота (ТУРНИФ), Полярном НИИ рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), в Национальном центре мониторинга морской среды (Китай, г.Далынь).

На защиту выносятся:

1. Единая концепция краткосрочного промыслового прогнозирования, основанная на системном анализе и информационной интерактивной компьютерной технологии.
2. Обоснование состава, структуры, принципов организации и функционирования автоматизированной системы обеспечения краткосрочными прогнозами важнейших промыслов пелагических объектов на основе судовых и авиационных данных.
3. Разработанные и испытанные в реальных условиях промыслов методы описания состояния внешней среды (векторные и скалярные свертки), математические модели решения основных задач КППО (градиентная, статистического распознавания и регрессионная с интегральными показателями состояния среды, диффузионная, энтропийная).
4. Способ выработки прогнозов промысловой обстановки, основанный на использовании комитета моделей-экспертов.
5. Оригинальные количественные методы оценки качества прогнозов промысловой обстановки и методик КППО.

6. Разработанная и проверенная на практике диалоговая программная система, которая позволяет обрабатывать, хранить и анализировать все необходимые для промыслового прогнозирования виды данных (промысловые, гидробиологические, гидрологические, включая дистанционные), а также реализует все основные этапы процесса подготовки краткосрочных прогнозов.

7. Полученные в ходе опытной эксплуатации разработок оценки значимости различных параметров описания внешней среды и изменчивости этих характеристик в течение промыслового сезона, количественные оценки качества компьютерных прогнозов как по судовым, так и дистанционным данным, результаты сравнительного анализа точности измерений температуры океана судовыми и авиационными средствами и другие материалы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на заседаниях и итоговых сессиях Ученого совета ТИНРО в 1979, 1982, 1985, 1986, 1988 гг., на заседании Ученого совета ВНИРО в 1982 г., на Международных конференциях IFIP по моделированию и оптимизации сложных систем (Новосибирск, 1978; Москва, 1982), на XIV Международном тихоокеанском конгрессе (Хабаровск, 1979), на заседаниях советско-финской Комиссии по исследованию операций (Москва, 1977; Алма-Ата, 1978), на заседании комиссии "Научные вопросы вычислительной техники" Академий наук соцстран (Ташкент, 1977), на I, II и III Всесоюзных совещаниях по проблемам краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования (Владивосток, 1982; Калининград, 1985; Керчь, 1989), на IV Всесоюзной конференции "Мировой океан" (Владивосток, 1983), на IX и X школах-семинарах по математическому моделированию в проблемах рационального природопользования (Новороссийск, 1985, 1986), на научно-практической конференции по методам промыслового прогнозирования (Мурманск, 1983), на Всесоюзной конференции "Теория, методология и практика системных исследований" (Москва, 1984), на Всесоюзном совещании "Исследование и рациональное использование биоресурсов дальневосточных и северных морей СССР" (Владивосток, 1985), на Всесоюзной конференции "Экономика освоения океана" (Владивосток, 1985), на III Всесоюзной конференции по проблемам промыслового прогнозирования (Мурманск, 1986), на Всесоюзной школе-семинаре "Технические средства и методы исследования Мирового океана" (Москва, 1987), на Международном симпозиуме по оперативной промысловой океанографии (Сент-Джонс, Канада, 1989), на заседании комиссии по западной Пацифике (ВЕСТПАК) МОК ЮНЕСКО (Ханджоу, Китай, 1990), на I Советско-Китайском симпозиуме по океанографии (Владивосток, 1990), на VI Международной конференции по моделированию и анализу природных ресурсов (Сабаудия, Италия, 1993).

Структура и объем работы. Диссертационная работа представляется в форме научного доклада и состоит из общей характеристики работы, введения, 11 разделов, основных результатов, списка основных публикаций автора из 41 наименования. Всего по теме опубликовано более 60 работ, включая монографию и два методических пособия. Исследования начаты в 1973 г. и основаны на данных промыслов сардины, сайры и сельди. Работы проводились в северной части Охотского моря, в экономической зоне России, в Японском море, в прикурильских водах северо-западной части Тихого океана.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Специфика рыбной промышленности заключается в том, что основная масса сырья для производства продукции общественного потребления доставляется промыслом. Поэтому одним из важнейших путей развития рыбного производства является повышение эффективности морского и океанического промысла. Ключевой момент в повышении эффективности промысла - сокращение потерь промыслового времени на основе разработки и внедрения современных методов управления рыболовным процессом. Указанная специфика рыбной промышленности диктует необходимость создания надежной системы рыболовных прогнозов, которые являются базой для управления промыслом. Современная практика промыслового прогнозирования позволяет выделить четыре основных вида прогнозов.

Перспективные прогнозы. Этот вид прогнозов составляется на срок от нескольких до 20 и более лет. По сути своей - это генеральные прогнозы развития отрасли, носящие существенно комплексный характер. Биологический аспект перспективного прогнозирования имеет целью оценку состояния биологических ресурсов и на этой основе установление предварительных объемов промысловых изъятий. Надежное прогнозирование такого рода возможно только при наличии адекватных моделей воспроизводства и динамики отдельных популяций, а также моделей взаимодействия их между собой и с окружающей средой, т.е. моделей биоценозов и экосистем.

Текущие прогнозы. Срок их действия - от одного до нескольких лет. Биологической основой этого вида прогнозов служат оценки состояния эксплуатируемых популяций, складывающегося под воздействием биотических

и абиотических условий. Главную роль при форматировании подобных оценок играют изучение и моделирование динамики численности популяций, процессов их воспроизводства и выживания, роста и смертности. Такие исследования служат обоснованием квот промысловых изъятий.

Оперативные прогнозы. Прогнозы, которые объединены в этот вид, составляются на сроки от величины порядка месяца до года. Их целью является оптимизация освоения сырьевой базы, в частности установленных квот вылова. В основе таких прогнозов лежат экологические закономерности вида. Научные исследования, обеспечивающие оперативное прогнозирование, направлены на изучение сезонных миграций и распределений, температурных и кормовых предпочтений промысловых объектов. Можно сказать, что научной базой этого вида прогнозов для морских пелагических объектов служат общие закономерности формирования высокопродуктивных зон в океане на уровне сезонного масштаба.

Краткосрочные прогнозы. Эти прогнозы составляются на периоды от одних до 10-15 сут и имеют целью определение картины распределения и основных перемещений промысловых концентраций биологического вида в рамках его традиционного района обитания в прогнозируемый период. Непосредственно по результатам краткосрочного прогнозирования решаются такие задачи, как выбор стратегии детального поиска скоплений судами промразведки, выбор районов лова, организация сдачи сырья и другие, при оптимальном решении которых вскрываются основные резервы сокращения непроизводительных затрат промыслового времени. Особое значение имеет этот вид прогнозов для промысла пелагических объектов.

Научной основой этого вида прогнозов являются закономерности формирования промысловых скоплений морских биологических объектов под воздействием биотических и абиотических факторов окружающей среды. Океанологическим фоном процессов формирования и динамики промысловой обстановки являются синоптическая и, частично, мезомасштабная изменчивость состояния океана. Связи между окружающей средой и промысловыми характеристиками соответствующего пространственно-временного масштаба лежат в основе краткосрочных промысловых прогнозов. Изучение этих связей в настоящее время ведется как на уровне попыток установления эмпирических закономерностей, так и на уровне математического моделирования. Эти вопросы рассмотрены в соответствующих разделах данной работы.

Из всего сказанного следует, что система рыболовных прогнозов имеет иерархическую структуру. И хотя в литературе иногда встречаются другие названия указанных видов прогнозов, это практически не меняет сути

дела. Выпадение из этой системы прогнозов любого уровня приводит к резкому снижению эффекта хозяйственной деятельности. Весьма характерным примером этого является ситуация с краткосрочным прогнозированием промысловой обстановки. До сих пор среди части специалистов рыбной промышленности, а иногда даже среди ученых бытует тенденция к подмене прогнозирования промысловой обстановки работами по поиску конкретных скоплений. Однако подмена прогнозирования поиском ведет к отрицательным экономическим последствиям, и подобная практика является далеко не оптимальной.

Такие ценные промысловые объекты северной части Тихого океана, как сайра, сардина, сельдь, скумбрия, лососи (во время морского периода жизни) и многие другие рыбы, во время нерестовых и кормовых миграций перемещаются в течение промыслового сезона на сотни и даже тысячи морских миль. В результате подвижности пелагических промысловых объектов и динамичности процессов формирования и распада их скоплений районы лова за двое-трое суток могут смещаться на 30-40 и более морских миль (см. рис. 1). В таких ситуациях поисковые работы должны охватывать акватории в десятки тысяч квадратных миль.

Однако за последние годы доля пелагических объектов в общем объеме вылова рыбной промышленности увеличилась весьма значительно, выросла и численность промыслового флота, а обеспеченность научно-поисковым флотом снизилась. Сегодня в дальневосточном бассейне нормой является соотношение научно-поисковых и промысловых судов 1:30 - 1:50. В этих условиях основное сокращение времени на поиск скоплений может быть достигнуто за счет обеспечения промысла надежными краткосрочными прогнозами. Здесь есть значительные резервы. Прогноз распределения перспективных для промысла районов на 3-5 сут вперед позволяет сузить в 8-10 раз акваторию поиска, т.е. акваторию, традиционную для распределения конкретного объекта в рассматриваемый период. Ежесуточные прогнозы промысловой обстановки - прогнозы распределения районов, благоприятных для образования скопления рыб, позволяют еще больше - иногда в 2-3 раза - уменьшить площадь, подлежащую обследованию гидроакустическим поиском. Именно за счет этого и сокращаются потери промыслового времени на поиск.

Необходимо подчеркнуть еще одну немаловажную функцию краткосрочных прогнозов. Анализ результатов промысла различных морских биологических объектов показывает весьма существенную изменчивость уловов от суток к суткам. Характерный пример приведен на рис. 2. Это в определенной степени объясняется тем, что добывающий флот часто теряет из по-

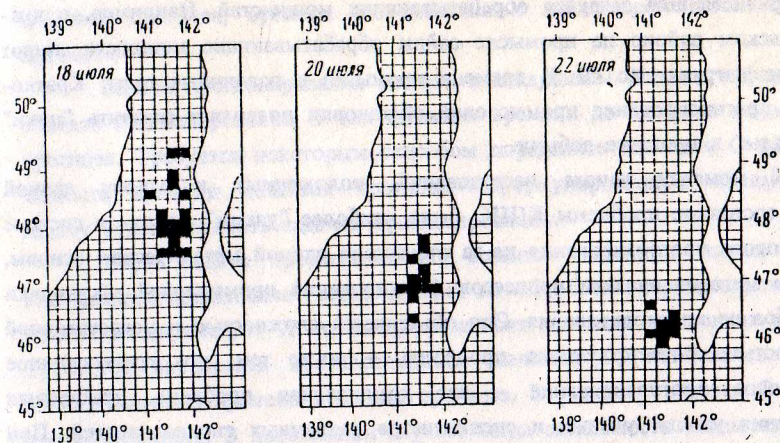


Рис. 1. Пример пространственных смещений районов промысла сардины иваси в Японском море в июле 1982 г.

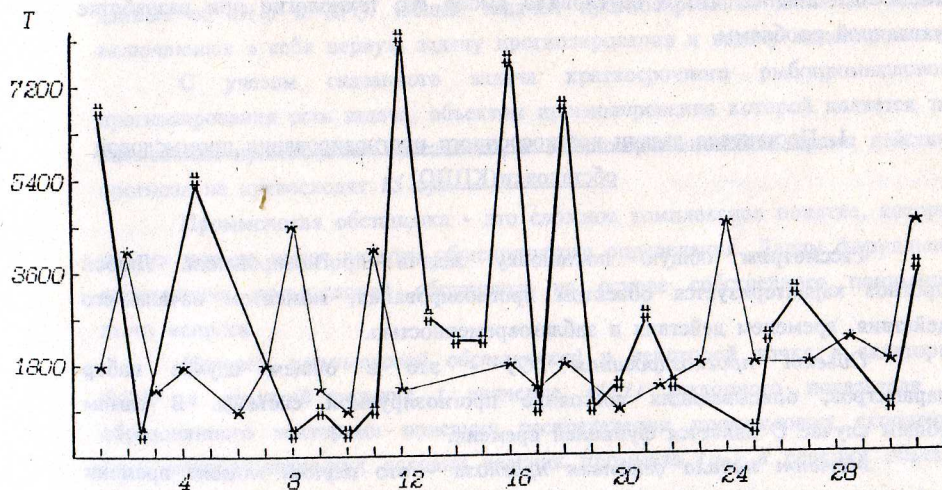


Рис. 2. Динамика суточного вылова (т) сардиновой промысловой экспедиции в южнокурильском районе. * - август 1980 г., # - август 1981 г.

ля зрения промысловые концентрации объектов лова, и как следствие - весьма неравномерная загрузка обрабатывающих мощностей. Например, в южнокурильском районе на промысле сайры обрабатывающие мощности имеют неполную нагрузку до 40 % времени промысла в различные годы. Краткосрочное прогнозирование промысловой обстановки позволяет сгладить "пики" и "провалы" в процессе добычи.

К моменту начала исследований, положенных в основу данной работы, состояние проблемы КППО было наиболее "узким" местом в системе промыслового прогнозирования из-за отсутствия единой методической основы, развитых методов анализа процессов формирования промысловой обстановки и способов ее прогнозирования. Это объясняется сложностью и недостаточной изученностью соответствующих процессов, а также тем, что краткосрочное промысловое прогнозирование - это комплексная проблема, требующая объединения усилий ученых и специалистов различных специальностей. При этом возникают дополнительные трудности, связанные с выработкой междисциплинарного подхода к ее решению.

Наиболее перспективным направлением решения таких комплексных, теоретически малообоснованных и недостаточно формализованных прикладных проблем, какой является проблема КППО, представляется системный анализ, что и обусловило выбор его технологии при разработке указанной проблемы.

1. Постановка задачи краткосрочного прогнозирования промысловой обстановки (КППО)

Рассмотрим общую постановку задачи прогнозирования. Любой прогноз характеризуется объектом прогнозирования, моментом начала его действия, временем действия и заблаговременностью.

Объект прогнозирования (O) - это в общем случае набор параметров, описывающих состояние прогнозируемой системы. В самом общем случае *O* является функцией времени.

Момент начала действия прогноза - это первый момент времени действия прогноза.

Время действия прогноза есть длина интервала времени, на который рассчитываются прогностические значения объекта прогнозирования.

Заблаговременность прогноза определяется как длина полуинтервала времени, начиная с момента формирования (точнее, с момента окончания формирования) прогноза до момента начала действия прогноза.

Назовем совокупность объекта прогнозирования, момента начала действия прогноза, времени его действия и заблаговременности *описанием прогноза*.

Задача прогнозирования состоит в следующем. Задана информация об объекте прогнозирования *O* как функция времени до момента формирования прогноза. Требуется некоторым способом определить значения *O* для любого момента времени действия прогноза. Сформулированную таким образом задачу будем называть задачей прогнозирования.

Часто задача прогнозирования ставится несколько иначе. Исходная информация представляет собой данные не об объекте прогнозирования, а о множестве параметров *X*, от которых зависят значения компонент объекта *O*. Требуется определить прогностические значения *O*, т.е. значения *O* для любого момента времени действия прогноза. Эту задачу назовем 2-й задачей прогнозирования. В простейшем случае, когда зависимости компонент объекта прогнозирования *O* от набора параметров *X* известны и представляются аналитически, 2-я задача сводится к 1-й с объектом прогнозирования *X* и последующему применению зависимости *O(X(t))*. Если же зависимости компонент *O* от набора параметров *X* неизвестны, то встает еще одна задача - задача моделирования такой зависимости. Для ее решения необходимы данные об *O(t)* и *X(t)*. Общей задачей прогнозирования является задача, включающая в себя первую задачу прогнозирования и задачу моделирования.

С учетом сказанного задача краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования есть задача, объектом прогнозирования которой является так называемая промысловая обстановка, а заблаговременность и время действия прогноза не превосходят 15 сут.

Промысловая обстановка - это сложное комплексное понятие, которое до сих пор не имеет четкого общепринятого определения. Дадим формальное определение промысловой обстановки на основе собственного понимания этого вопроса.

Назовем *промысловой обстановкой* в некоторой точке *r* акватории $S \subset R^2$ в текущий момент *t* значение *u(r,t)* векторного показателя *u*, образованного векторами описания распределения промысловых скоплений (*u*₁), метеорологических условий ведения промысла (*u*₂) и реакции объекта (*u*₃), т.е.

$$u(r,t) = \begin{pmatrix} u_1(r,t) \\ u_2(r,t) \\ u_3(r,t) \end{pmatrix}.$$

Промысловая обстановка в некоторой точке r в момент t благоприятна, если значения всех компонент векторов u_1, u_2, u_3 в этой точке в данный момент лежат в областях благоприятных значений. Компоненты u_3 прогнозируются исходя из биологического состояния объекта и его реакций на раздражители, в частности на орудия лова, в каждом состоянии. Вектор u_3 представляет собой относительно долгопериодную (синоптического масштаба) составляющую $u(r, t)$. Поэтому в большинстве случаев при рассмотрении процессов изменений промысловой обстановки меньшего масштаба вектор описания u_3 может иметь фиксированные значения. Что касается прогнозирования значений вектора u_2 , то он является объектом в задаче прогнозирования метеоусловий на рассматриваемой акватории S ; решение этой задачи входит в компетенцию метеослужбы, которая и дает такие прогнозы.

Таким образом, прогнозирование промысловой обстановки на практике обычно может быть сведено к прогнозированию распределения промысловых концентраций при известных значениях векторов u_2, u_3 . При этом нужно помнить, что речь идет о промысловой обстановке для "осредненных" судов и орудий лова. Это распределение может быть описано некоторой функцией $u(r, t)$, такой, что

$$\int_S u(r, t) dr = U_s(t), \quad S \subset R^2,$$

где $U_s(t)$ количество рыбы рассматриваемого вида в рамках акватории S на момент времени t . Обозначим через $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ совокупность биотических и абиотических факторов, влияющих на распределение промысловых концентраций. Тогда

$$u(r, t) = u(X(r, t)), \quad r \in S.$$

Процесс решения задачи краткосрочного прогнозирования промысловой обстановки (КППО) разбивается на три этапа:

1) моделирование по исходным данным зависимости $u(X)$, т.е. моделирование распределения рыбы по области R^2 в зависимости от значений множества факторов $X(r, t)$. Модель зависимости $u(X)$ будем обозначать $\hat{u}(X)$;

2) определение прогностических значений $\tilde{X}(r, t)$ множества факторов $X(r, t)$;

3) определение по значениям $\tilde{X}(r, t)$ с помощью модели $\hat{u}(X)$ значений

$$\tilde{u}(r, t) = \hat{u}(\tilde{X}(r, t))$$

объекта прогнозирования задачи КППО и формирование краткосрочного рыбопромыслового прогноза.

2. Человеко-машинная система как путь решения задачи КППО

Технология системного анализа предполагает, с одной стороны, что объект исследования будет рассматриваться как сложная система, а с другой, - что для этого будут использоваться математические модели, реализованные средствами вычислительной техники.

Чтобы обеспечить решение поставленной задачи необходимы специальные средства для накопления, обработки, анализа данных, необходимых для построения модели (или системы моделей) $\hat{u}(X)$, а также прогностических (или заменяющих их) значений $\tilde{X}(r, t)$. Для этих целей была разработана, реализована и проверена на практике человеко-машинная система оперативного рыбопромыслового прогнозирования и управления - СОРПУ (рис. 3).

Подсистема сбора и передачи информации включает в себя основные источники данных, используемые при промысловом краткосрочном прогнозировании: 1) поисковые и научно-исследовательские суда, выполняющие регулярные фоновые съемки, гидроакустический поиск скоплений рыбы и контрольные промысловые операции; 2) добывающие суда промысловых экспедиций, поставляющие данные о результатах лова в различных районах; 3) гидрометеорологические центры и агентства, передающие по факсимильным и другим каналам карты атмосферных и океанологических характеристик; 4) самолеты авиаразведки и искусственные спутники Земли, работающие в рыбопромысловых целях. Данная подсистема включает в себя и соответствующие каналы связи, по которым информация поступает в прогностический центр, имеющий в своем распоряжении ЭВМ.

Подсистема ввода, контроля и обработки данных включает устройства подготовки данных для ввода в ЭВМ, а также математическое обеспечение ввода, различных видов контроля (включая визуальный) и методов обработки информации. Каждому виду данных соответствует свой комплекс программ ввода, контроля и обработки. Например, обработка фоновых съемок заключается в восстановлении различного рода физических и гидробиологических полей, включая интерполяцию и согласование данных измерений на отдельных станциях. Обработка промысловой статистики при

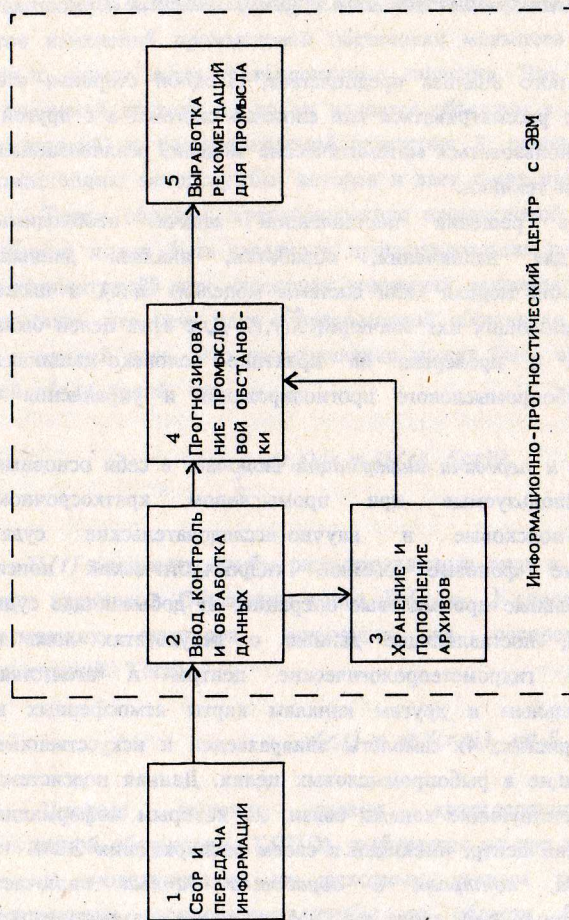


Рис. 3. Обобщенная схема человеко-машинной системы оперативного рыбопромышленного прогнозирования и управления (СОРПУ).

построении промышленного планшета сводится к сортировке информации по пространству и интеграции ее по времени. Факсимильные и дистанционные данные предварительно сканируются специальными средствами, фильтруются и т.д.

Подсистема хранения и пополнения информации представляет собой оперативный банк данных, являющийся нижним уровнем иерархической системы банков данных отрасли. База банка данных - это набор архивов по каждому типу данных для различных объектов и районов промысла. Наличие такого банка позволяет готовить не только ретроспективную информацию для изучения условий формирования промышленной обстановки, но и реализовать в автоматическом режиме адаптивную схему "обучения" ЭВМ, т.е. настройку параметров алгоритмов прогнозирования на текущую ситуацию в системе "окружающая среда - биологический объект".

О подсистеме прогнозирования промышленной обстановки следует сказать особо. Эта подсистема, безусловно, является ключевой, так как именно здесь реализуется моделирование отношений "окружающая среда - промышленный объект". Исходная концепция при разработке данной подсистемы состояла в том, что для описания изучаемых сложнейших явлений необходимо иметь набор различных моделей. Проверка адекватности этих моделей является и косвенной проверкой исходных положений, предпосылок, на которых основаны такие модели. Следовательно, изучая и сравнивая модели, мы имеем возможность проверять и сравнивать между собой различные гипотезы о процессах формирования и изменения распределения промысловых концентраций рыб. Однако главное заключается в том, что прогностические решения о промышленной обстановке, основанные на совокупности нескольких моделей, как показывает опыт, более точны, чем решения этих отдельных моделей.

Подсистема выработки рекомендаций для промысла. В ее состав входят группы лиц, принимающих решения, и средства подготовки этих решений, а также каналы связи, по которым осуществляется доведение прогнозов и рекомендаций до судов промысловых экспедиций.

За исключением первой подсистемы, система краткосрочного рыбопромышленного прогнозирования и управления реализована на базе персонального компьютера типа РС IBM AT/XT, что практически снимает ограничения на использование СОРПУ. Она эксплуатировалась в береговых и судовых прогностических центрах. Вопросы программной реализации СОРПУ, а также примеры результатов ее функционирования представлены в специальном разделе данной работы. Основное внимание в наших исследованиях уделялось разработке четвертой подсистемы, т.е. изучению и моделированию за-

кономерностей образования рыбопродуктивных, или перспективных для промысла, участков морской акватории и созданию на этой основе методов для КППО.

3. Экологические предпосылки математического моделирования промысловой обстановки

Общие закономерности формирования продуктивных зон океана изучены на сегодняшний день достаточно хорошо. Считается, что пятнистый характер образования и аккумуляции органического вещества в морях и океанах обусловлен неравномерностью полей плотности и температуры воды, наличием фронтальных поверхностей, пикноклины и других структурных элементов. Перенос органического вещества фито- и зоопланктона зависит прежде всего от течений. Особо следует подчеркнуть роль круговоротов и вихрей, областей вергенций и вторичных фронтов в концентрации планктонных организмов, что в свою очередь обуславливает приуроченность к периферии таких образований рыбных промысловых объектов.

Однако при переходе к рассмотрению более детальных механизмов формирования промысловых участков картина резко усложняется. Образование и распределение скоплений животных обусловлены множеством внутренних и внешних факторов. Под внутренними факторами подразумевают такие, которые определяют состояние особей данного вида. Внешние - это факторы среды. Как известно, поведение животных, в том числе и процессы образования их скоплений, в значительной степени определяются условиями среды. Однако одни и те же условия внешней среды по-разному влияют на биологический объект в зависимости от его физиологического состояния. При изучении и моделировании процессов формирования и распределения промысловых концентраций рыб для каждой стадии развития данного вида в первую очередь необходимо выделить наиболее важные внешние факторы, т.е. те, которые определяют изучаемые процессы. Далее следует исследование механизмов влияния этих факторов на рассматриваемый объект в фиксированном состоянии. Только существенно сузив круг рассматриваемых внешних факторов, можно переходить к математическому моделированию интересующих нас процессов взаимодействия "среда - биологический объект". Нами был проведен анализ литературных источников, посвященных влиянию различных факторов на распределение промысловых концентраций рыб. Особое внимание уделено пелагическим промысловым объектам дальневосточного бассейна, на материалах которых выполнены исследования

настоящей работы. В первую очередь это сардина иваси, сайра, а также охотоморская сельдь. Основная масса публикаций содержит попытки связать промысловую обстановку с одним-двумя факторами окружающей среды. Причем, как правило, констатируется наличие качественных связей. Значительно меньше исследований комплекса факторов среды, хотя многие авторы и указывают на то, что промысловая обстановка и распределение скоплений зависят от множества таких факторов. На основании литературных данных составлена схема взаимодействия абиотических и биотических факторов, влияющих на образование промысловых концентраций пелагических рыб (рис. 4).

4. Математические методы описания состояния внешней среды

Для решения задачи КППО в той постановке, как она была сформулирована, необходимо сформировать систему описания $X=\{x_k\}$, $k=\overline{1,n}$, состоящую из факторов-признаков, экологически значимых для процессов формирования рыбопродуктивных участков. Выбор того или иного подхода к выделению значимых факторов обычно связан с определенным классом моделей многомерных объектов. Само понятие значимости, полезности фактора-признака описания в различных моделях имеет различный смысл: в регрессионных моделях оно означает тесноту статистической связи, в моделях распознавания - меру различимости классов-образов.

Обычно состояние среды описывается вектором параметров, отражающих различные ее свойства. Естественно, что такое описание не является однозначным. Одной из центральных проблем экологических исследований является проблема выделения основных, значимых факторов внешней среды, влияющих на развитие и процветание организма (группы организмов, вида, сообщества) в данном местообитании. Здесь рассматривается важность факторов-признаков среды с точки зрения их влияния на образование промысловых скоплений особей определенного биологического вида. Мы исходим из того, что для образования скоплений промыслового объекта важно не само абсолютное значение того или иного фактора окружающей среды, а тот факт, принадлежит или нет это значение интервалу толерантности вида в данном биосостоянии к данному фактору.

На основе методов шенноновской теории информации вводится понятие количества информации, которая содержится в значении k -го фактора-признака системы описания среды $X=\{x_k\}$, $k=\overline{1,n}$ с точки зрения определения возможных мест скопления промыслового объекта:

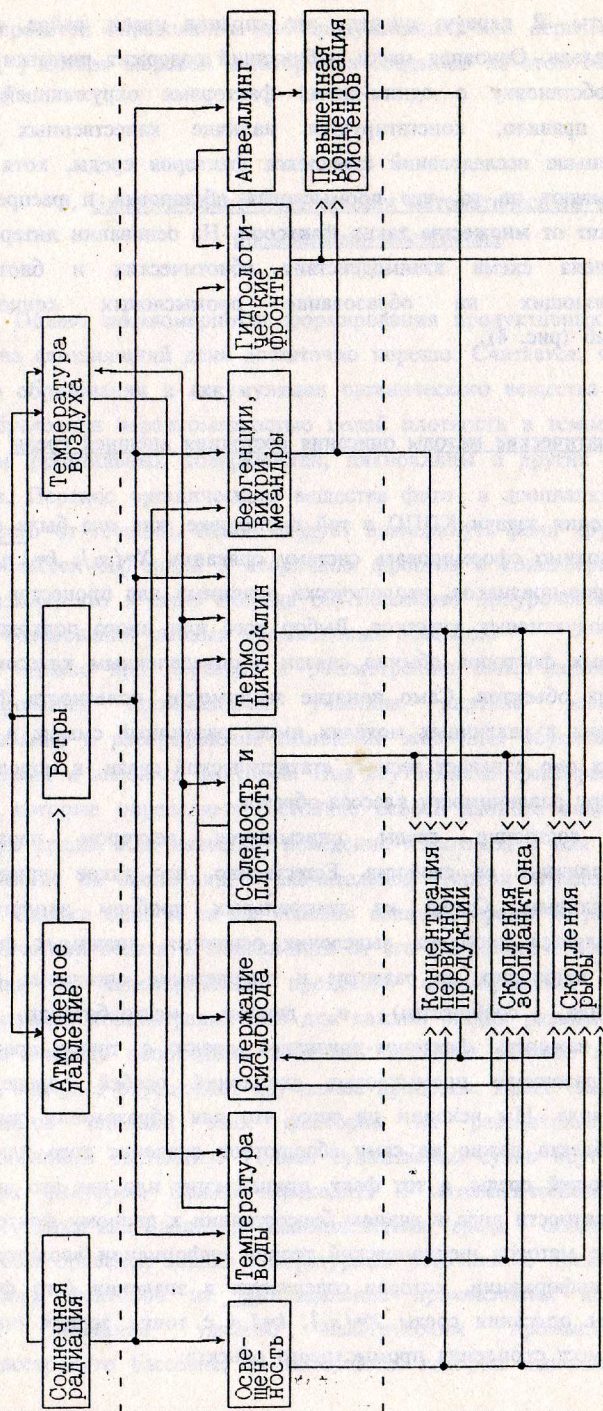


рис. 4. Схема взаимодействия основных абиотических, а также некоторых биотических факторов, обуславливающих промысловые концентрации пелагических рыб.

$$I_k = I(A_k, x_k) = H(x_k) - H(x_k | A_k),$$

где в правой части стоят априорная энтропия Шеннона для события, состоящего в измерении признака x_k :

$$H(x_k) = - \int_{\Omega_k} p(x_k) \log p(x_k) dx_k .$$

и условная энтропия:

$$H(x_k | A_k) = - \sum_{j=1}^2 \int_{\Omega_k} P(A_{jk}) p(x_k | A_{jk}) \log p(x_k | A_{jk}) dx_k .$$

Событие A_k заключается в принятии средой состояния из интервала толерантности (интервала значений, благоприятных для образования промысловых скоплений) к x_k (исход A_{1k}) или вне его (исход A_{2k}).

Исследование вопроса о статистической зависимости признаков x_k и признаков j -го исхода события A привело нас к следующему выводу. Для оценки количества информации, заключенной в системе описания X , следует использовать неравенство

$$I(A, X) \geq \sum_k I(A_k, x_k),$$

которое превращается в равенство при условии

$$p(X) = \prod_k p(x_k), \quad k = \overline{1, n} .$$

В противном случае правая часть неравенства является заниженной оценкой $I(A, X)$.

Экологической значимостью k -го фактора-признака назовем величину относительного количества информации

$$I_k^* = I(A_k, x_k) / \sum_k I(A_k, x_k), \quad k = \overline{1, n} .$$

Сформируем *содержательную систему описания*, расположив x_k в ряд по убыванию величины I_k^* и выбрав первые \tilde{n} признаков ($\tilde{n} \leq n$), которые обеспечивают достижение наперед заданного уровня значимости :

$$\sum_k I_k^* \geq \eta, \quad \eta \in [0, 1], \quad k=1, \tilde{n}.$$

Изложенный способ формирования содержательной системы описания состояния среды программно реализован в рамках СОРПУ и в течение ряда лет использовался для идентификации различных векторных моделей КППО.

На практике для выбора уровня значимости содержательной системы описания (или для определения количества признаков, обеспечивающих этот уровень значимости) приходится исходить из того, насколько результаты математической модели, использующей описание среды в виде $\{x_k\}$, соответствуют реальности, т.е. из адекватности модели. Проверка адекватности модели сводится к проверке близости реальной $u(r, t)$ к смоделированной $\tilde{u}(r, t)$ промышленной обстановке на некоторой акватории S .

Оптимальным будет такое η_{opt} (или \tilde{n}_{opt}), которое максимизирует значение выбранной меры близости между

$$u(r, t) \text{ и } \tilde{u}_\eta(r, t), \quad \eta \in [0, 1], \quad r \in S \subset R^2.$$

В качестве таких мер использовались оценки качества КППО специального вида, которые приведены в соответствующем разделе работы. Они позволяют сравнивать реальную промышленную обстановку с ее модельными оценками и реализованы средствами СОРПУ.

Альтернативным векторному описанию состояния среды является скалярное описание этого состояния с помощью интегрированных показателей. Основной причиной, побуждающей искать обобщенные показатели состояния экосистем или их подсистем (среды), является желание расширить число классов моделей, применяемых для их описания. Дело в том, что целый ряд моделей ориентирован на описание среды скалярным показателем. Такие модели рассматриваются в соответствующих разделах работы. Поэтому в рамках решения задачи КППО для описания состояния внешней среды предложена специальная интегральная характеристика. Такая характеристика-функционал описывает степень благоприятности среды для образования промысловых скоплений объекта в любой точке r акватории S в момент времени t :

$$H(r, t) = \sum_k \Gamma_k \frac{p(x_k(r, t) | A_{1k})}{\max p(x_k(r, t) | A_{1k})} / \sum_k \Gamma_k, \quad k=1, \tilde{n}.$$

$$H(r, t) \in [0, 1],$$

где \tilde{n} - число признаков содержательной системы описания состояния среды. Этот функционал реализует идею о том, что в благоприятном районе значения признаков содержательной системы описания среды должны принадлежать определенным множествам значений - своеобразным интервалам толерантности. Заметим, что вероятностные характеристики, входящие в обобщенную форму такого функционала, как и аналогичные характеристики в различных моделях данной диссертации, определяются на основе их выборочных оценок. В СОРПУ для этих целей использована предложенная автором и использовавшаяся в течение 15 лет непараметрическая оценка плотности распределения вероятностей.

В сериях экспериментов с моделями, использующими векторное и интегральное описание состояния среды на одних и тех же исходных данных, результаты, как правило, не дают оснований отдать предпочтение тому или другому подходу. Такая задача и не ставится, поскольку выработка окончательных прогнозов промышленной обстановки, как уже отмечалось, по нашей концепции должна производиться на основе решений по различным моделям.

Были выполнены многочисленные оценки экологической значимости различных признаков описания среды по многолетним материалам промыслов сардины иваси в япономорском и южнокурильском районах, сайры в южнокурильском районе, сельди в охотоморском районе для различных эпизодов промысловых периодов этих рыб. При этом не удалось обнаружить статистически достоверных случаев наличия доминирующей значимости у одного-двух признаков. Это говорит о том, что на распределение скоплений пелагических рыб (на образование перспективных участков лова) влияет комплекс экологических условий. Следовательно, модели для краткосрочного промыслового прогнозирования должны использовать векторное или высокоагрегированное описание состояния среды.

Важным результатом исследования является также установление нестационарности экологической значимости признаков в пределах промысловых периодов для всех рассмотренных видов рыб. Выделено пять видов динамики экологической значимости признаков: рост, падение, рост - падение, падение - рост, колебание. Основными причинами этого явления следует считать сезонную динамику состояния деятельного слоя океана и изменение со-

стояния промыслового объекта в рамках наблюдаемого периода. Это хорошо иллюстрирует рис. 5. Игравшие существенную роль в распределении и поведении сардины иваси в южнокурильском районе в начале рассматриваемого периода (конец июля) температура воды на поверхности (x_1) и температура на горизонте 10 м (x_2) уже к середине августа утрачивают свое значение. К этому моменту и особенно к 4-й рассматриваемой декаде возрастает значение температуры воды на горизонте 50 м (x_3) и характеристик термоклина (x_{28} , x_{29}). По видимому, это связано с углублением прогретого слоя и расширением зоны обитания объекта промысла в вертикальном направлении за счет освоения более глубоких слоев. При таком проникновении объекта в глубину температура океана в верхних слоях перестает быть лимитирующим фактором. Его экологическая значимость уменьшается. Напротив, значимость температуры воды на более глубоких горизонтах растет, так как именно эта температура лимитирует возможность образования крупных скоплений и именно ее благоприятное значение становится индикатором мест вероятного обитания рыбы.

Динамика экологической значимости признаков описания среды отражает изменчивость закономерностей, связывающих распределение и поведение промысловых объектов с состоянием окружающей среды. Поэтому изучение таких закономерностей должно вестись на моделях, обладающих возможностью адаптации к изменениям этих закономерностей во времени. Полученные результаты объясняют, почему, несмотря на большое число попыток, до сих пор не получено имеющих постоянное прогностическое значение уравнений регрессии или других простых моделей, связывающих промысловую обстановку с внешними факторами.

5. Концепция адаптивного моделирования промысловой обстановки

Многочисленными исследованиями на различных промыслах, в том числе и нашими, по определению экологической значимости факторов-признаков окружающей среды установлено, что каждому биологическому состоянию промыслового объекта соответствуют свои условия образования скоплений. Это необходимо учитывать при моделировании закономерностей распределения скоплений животных в зависимости от условий окружающей среды.

Матрицу $\| \| b_{gd} \| \|$ размерностью $G \times D$, строки которой g ($g=1, G$) определяют различные периоды годового цикла особей данного вида, а столбцы d ($d=1, D$) - различные состояния популяции рассматриваемого вида, назовем

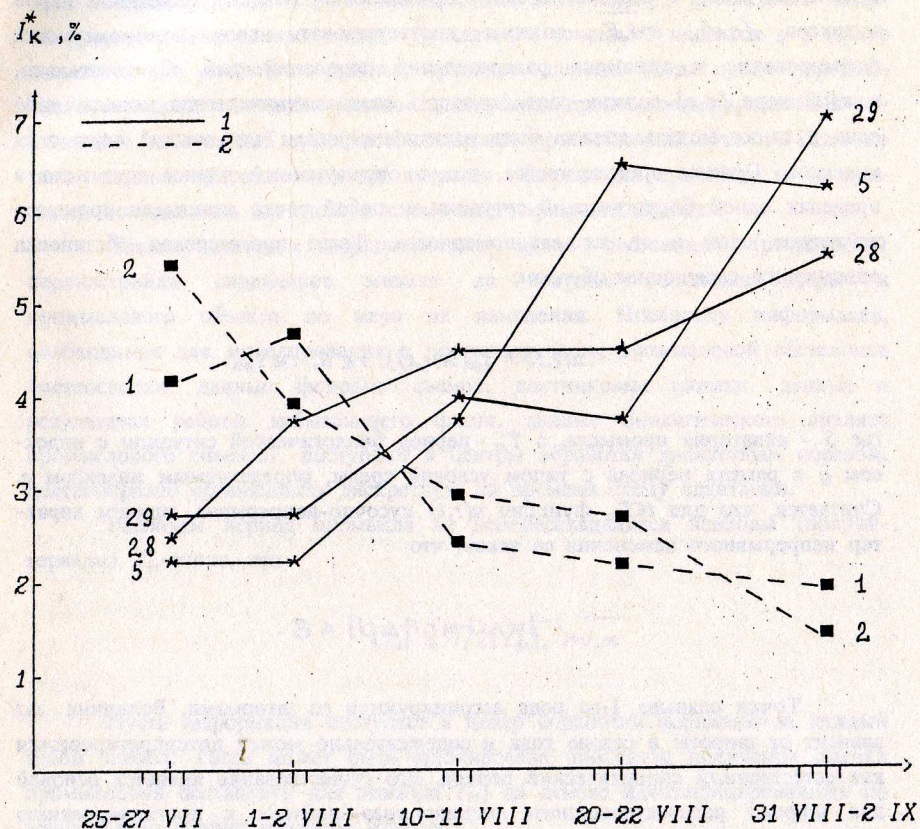


Рис. 5. Динамика экологической значимости некоторых признаков описания среды с тенденцией типа "рост" (1) и типа "падение" (2) в Южно-Курильском районе на промысле сардины в 1979 г. (1, 2, 5 - температура воды на глубине 0 м, 10 м, 50 м соответственно; 28 - температура на нижней границе термоклина, 29 - градиент температуры в термокline).

матрицей состояний промыслового объекта. Элементы этой матрицы назовем биологическими ситуациями и обозначим как $b_q = b_{gd}$; $q = 1, Q$; $Q = G \times D$.

Если, например, E - число типов лет по термическим условиям то каждой ситуации в системе "среда - промысловый объект", описанной парой индексов $\{q, e\}$, $e = 1, E$, должны соответствовать свои закономерности формирования и динамики распределений скоплений рыб. Следовательно, каждой паре $\{q, e\}$ должна соответствовать своя математическая модель, либо одна и та же модель должна быть идентифицирована для каждой пары этих индексов. Причем предполагается, что в определенный период промысла в пределах одной биологической ситуации в любой точке акватории промысла действуют одни и те же закономерности. Тогда промысловая обстановка описывается следующим образом:

$$u(r, t) = f_{qe}(X(r, t)), \quad r \in S, \quad t \in T_{qe},$$

где S - акватория промысла, а T_{qe} - период биологической ситуации с индексом q в рамках периода с типом условий среды, определяемым индексом e . Считается, что для $t \in T_{qe}$ функция $u(r, t)$ кусочно-непрерывна, причем характер непрерывного изменения ее таков, что

$$|u(r, t) - u(r, t + \Delta t)| \leq \varepsilon.$$

Точки разрыва 1-го рода ассоциируются со штормами. Величина Δt зависит от широты и сезона года и содержательно может интерпретироваться как естественный синоптический период. Его существование является основой для широко распространенного *инерционного подхода* к прогнозированию промысловой обстановки, т.к. в настоящее время практически отсутствуют надежные методы прогнозирования множества факторов среды, в первую очередь гидрологических и гидробиологических, под воздействием которых складывается промысловая обстановка. Пусть каким-либо способом установлены закономерности, связывающие промысловую обстановку $u(r, t)$ с множеством влияющих факторов $X(r, t)$, например, построена модель этих закономерностей \hat{f}_{qe} для фиксированных e и q . Тогда, имея значения факторов внешней среды в момент времени t_1 на акватории S (такие данные могут быть получены в ходе выполнения океанологического полигона), можно определить оценку

$$\tilde{u}(r, t_1) = \hat{f}_{qe}(X(r, t_1)), \quad r \in S, \quad t \in T_{qe}$$

и экстраполировать ее до момента t_2 , такого, что $|t_1 - t_2| \leq \Delta t$. Таким образом, в пределах T_{qe} может быть получен прогноз временем действия Δt , который составляет обычно несколько суток.

Однако, чтобы строго использовать этот подход, необходимо получить идентифицированные модели \hat{f}_{qe} для всех сочетаний индексов q и e , что возможно при достаточно полных архивных данных. Тогда путем переключения с модели на модель можно адаптировать процесс моделирования к изменениям во внешней среде и в состоянии промыслового объекта. Если же таких данных недостаточно, что является обычным на практике, то предлагается использовать адаптивную схему идентификации моделей.

Такая адаптация осуществляется путем постоянной (регулярной) перенастройки параметров модели на текущее состояние среды и промыслового объекта по мере их изменения. Поскольку информация, необходимая для моделирования и прогнозирования промысловой обстановки (метеосводки, данные фоновых съемок, спутниковые снимки, данные о результатах работы добывающего флота, данные биологического анализа промыслового объекта), поступают в центры обработки дискретным образом, целесообразно организовать дискретную по времени схему адаптации.

Разобьем период промысла на непересекающиеся эпизоды (полуинтервалы) T_i , такие, что

$$|T_i| \leq 1/2 |T_{qe}|, \quad i = \overline{1, m}.$$

Пусть информация поступает в центр обработки порциями за каждый такой эпизод. Тогда может быть организована процедура получения оценки промысловой обстановки для эпизода T_{i+1} на основе идентифицированных по данным предыдущих эпизодов моделей:

$$\tilde{u}_{i+1}(r, t) = \hat{f}_i(X(r, t)), \quad r \in S, \quad t \in T_{i+1}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Такая процедура позволяет в неявной форме учитывать изменения в системе "окружающая среда - промысловый объект", происходящие под воздействием сезонных трендов среды и динамики состояния объекта. Изменения в этой системе, накопившиеся на i -м шаге будут учтены и отражены в параметрах математических моделей на $(i+1)$ -м шаге. Величина шага в процедуре адаптации выбирается из эмпирических соображений. Приведенное выше неравенство служит его верхней оценкой. Нижней оценкой является величина временного интервала между отдельными

поступлениями данных, достаточных для надежного определения параметров моделей промысловой обстановки. Для выбора конкретного значения шага в адаптивной схеме идентификации моделей необходимо для каждого района, сезона и объекта промысла проводить специальное исследование, которое сводится к определению оптимального времени действия инерционного прогноза КППО. Например, целенаправленной серией экспериментов нами показано, что качество инерционных прогнозов промысловой обстановки на каждом шаге адаптивной схемы начинает снижаться, когда период их действия превосходит 5-7 сут, т.е. превышает величину естественного синоптического периода. Этот результат получен для осеннего периода промысла сардины в Японском море, что демонстрируется ходом правой части кривой на рис. 6.

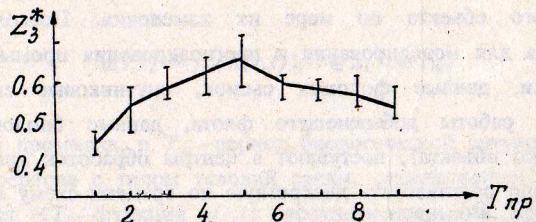


Рис. 6. Зависимость среднего по серии экспериментов качества прогнозов промысловой обстановки (Z_3^*) от периода действия инерционного машинного прогноза ($T_{пр}$) (по данным промысла сардины в япономорском районе в сентябре-октябре 1982 г.)

Приведем еще одно важное обоснование использования на каждом шаге адаптивной схемы инерционных прогнозов состояния среды в моделях промысловой обстановки. Условия внешней среды создают предпосылки формирования распределения промыслового объекта по акватории. Для реализации этих предпосылок необходимо определенное время. Наши данные показывают, что после формирования прогноза на основе океанологической информации проходит 3-5 сут, прежде чем оценка качества прогноза достигнет максимального значения (см. ход левой части кривой на рис. 6). Следовательно, реализация распределения рыбы, определяемого условиями среды, "запаздывает" относительно текущего состояния среды на 3-5 сут. Таким образом, текущее состояние среды несет в себе "прогностическое" качество по отношению к промысловой обстановке, что и открывает возможность ее инерционного прогнозирования на каждом оптимально выбранном шаге адаптивной схемы идентификации моделей КППО.

В СОРПУ реализованы необходимые средства для организации адаптивной схемы идентификации и оценки оптимального шага адаптации. Многолетний опыт использования рассмотренного подхода на материалах про-

мысла различных пелагических рыб дальневосточного бассейна показал его высокую практическую ценность. Таким образом обходится трудность проблемы КППО, связанная с отсутствием надежных методов прогнозирования океанологических условий синоптического масштаба, в частности определения прогностических значений $\tilde{X}(r,t)$ (см. раздел о постановке задачи КППО). Следовательно, основное внимание должно быть сконцентрировано на моделировании распределения промысловых объектов под воздействием условий окружающей среды.

6. Универсальные оценки качества краткосрочных рыбопромысловых прогнозов

Для исследования адекватности математических моделей КППО и сравнения их между собой необходимы количественные методы, не зависящие от природы моделей. Такие универсальные оценки были предложены нами и использовались на практике в течение целого ряда лет. Для практических целей обычно достаточно прогноза, выделяющего перспективные районы промысла и объемы ожидаемых выловов в них. Менее детализованным является прогноз распределения перспективных районов без объемов вылова. Именно этот случай может иметь наибольшее распространение в практике промысла подвижных, в частности пелагических, объектов промысла. При промысле некоторых объектов наблюдается ситуация, когда район лова стабилен, а меняется в нем только вылов. В этом случае за содержание прогноза принимается ожидаемый вылов в постоянном районе промысла. Рассмотрим возможные подходы к оценке качества прогнозов промысловой обстановки.

1. Оценка качества прогнозов по площадям. Введем следующие обозначения площадей: S_p - рекомендованный район промысла, S_ϕ - фактический район лова. Априорные оценки вероятностей ошибок 1-го (p_1) и 2-го (p_2) рода могут быть определены следующим образом:

$$p_1 = \frac{S_\phi | S_p}{S_\phi}, \quad p_2 = \frac{S_p | S_\phi}{S_p}.$$

Перейдем от вероятностей ошибок к достоверностям:

$$d_1 = 1-p_1, \quad d_2 = 1-p_2.$$

Так как d_1 и d_2 изменяются в одном и том же интервале, имеют одинаковую важность при оценке прогноза, то можно для оценки качества прогноза воспользоваться известной мультипликативной сверткой векторного показателя, которая в данном случае приводит к выражению:

$$Z_1 = d_1 d_2 = \frac{(S_\phi \cap S_p)^2}{S_\phi \times S_p}.$$

Кроме мультипликативной возможны и другие свертки для вектора (d_1, d_2) . В частности, можно использовать аддитивную свертку

$$Z(\lambda) = \lambda d_1 + (1-\lambda)d_2, \quad 0 \leq \lambda \leq 1.$$

2. Оценка качества прогнозов по объемам вылова. Введем обозначения: Y_p - прогнозируемый улов в рекомендованном районе S_p , $Y_{p\phi}$ и Y_ϕ - фактические уловы в районах S_p и S_ϕ . Для оценки качества прогноза используем тот же подход, что и в предыдущем случае.

$$p_1 = (Y_\phi - Y_{p\phi})/Y_\phi, \\ p_2 = \max \{(Y_p - Y_{p\phi})/Y_p, 0\},$$

тогда:

$$d_1 = Y_{p\phi}/Y_\phi, \quad d_2 = \min \{Y_{p\phi}/Y_p, 1\}.$$

Для этого случая критерий качества определяется как

$$Z_2 = \left\{ \left(\frac{Y_{p\phi}^2}{Y_p - Y_\phi} \mid Y_p \geq Y_{a\pi} \right), \left(\frac{Y_{p\phi}}{Y_\phi} \mid Y_{p\phi} \geq Y_p \right) \right\}.$$

3. Смешанная оценка прогноза. Заметим, что величина d_1 не зависит от прогнозируемого улова. Заменив d_1 в оценке Z_1 на $Y_{p\phi}/Y_\phi$, получим

оценку, которой можно пользоваться и при прогнозировании только перспективных районов промысла, и при прогнозировании районов с указанием ожидаемого вылова в них, и при прогнозировании производительности любой точки акватории промысла:

$$Z_3 = \frac{Y_{p\phi}}{Y_\phi} \times \frac{S_p \cap S_\phi}{S_p}.$$

В этом случае ошибка 2-го рода оценивается площадью ошибочно рекомендованного района, а ошибка 1-го рода - уловом в районе, не вошедшем в рекомендованный.

Оценки Z_1 и Z_3 дают близкие результаты, если распределение объекта лова в районе приблизительно равномерное. Если это не так, то оценка Z_3 является более предпочтительной как учитывающая неоднородность района лова. Оценка качества краткосрочных рыбопромысловых прогнозов Z_3 является наиболее унифицированной, простой и удобной для практического использования. Многолетний опыт показал, что из соображений лучшего понимания смысла оценки качества КППО целесообразнее использовать не Z_3 , а величину

$$Z^*_3 = \sqrt{Z_3}.$$

4. Оценка случая прогнозирования вылова. Для случая, когда содержание КППО определяется только объемом возможного вылова, а перспективный район остается неизменным или не прогнозируется, в соответствии с рассмотренным выше подходом получим:

$$d_1 = \min \{Y_p/Y_\phi, 1\}, \quad d_2 = \min \{Y_\phi/Y_p, 1\},$$

и далее

$$Z_4 = \min \{Y_p/Y_\phi, Y_\phi/Y_p\}.$$

При использовании предложенных оценок следует помнить, что сравнение качества прогнозов, полученных разными методами, может проводиться только при условии их одинакового содержания, периода действия и заблаговременности.

7. Теоретические подходы к моделированию промысловой обстановки

Согласно формальной постановке задачи КППО промысловая обстановка рассматривается как распределение промыслового объекта (вида рыб) на некоторой акватории. Первой задаче прогнозирования (раздел 1) соответствуют экстраполяционные модели. Например, А.А.Строгановым использован кинематический подход Лагранжа к промысловому прогнозированию, суть которого заключается в нанесении на планшет и осреднении промысловых данных, проведении и сглаживании изолиний уловов. По серии последовательных карт можно экстраполировать положение изолиний. Локальный кинематический метод (метод Эйлера) используется для построения графика изменения уловов для каждого квадрата акватории промыслового района по времени. Этот график сглаживается, аппроксимируется аналитически или графически и экстраполируется на прогнозируемый период.

Приведем еще один пример подхода к прогнозированию на основе промысловых данных. По данным об уловах добывающих судов восстанавливается траектория смещения района лова за несколько промысловых циклов, например суток. В архиве промысловых планшетов предыдущих лет выделяется ситуация, когда последовательность перемещения из одного квадрата в другой была наиболее близка к последовательности текущей траектории. В качестве района вероятного перемещения промысла берется квадрат, в который перешла траектория архивного аналога текущей ситуации. Здесь представлена несколько упрощенная идея подхода, который реализуется на базе логико-дискретных методов, в частности метода тупиковых тестов. Надо отметить, что этот подход был реализован на ЭВМ и в течение ряда лет апробировался на сайровом промысле в южно-курильском районе. К сожалению, сравнимых показателей качества прогнозов по данной методике в нашем распоряжении не имеется, а в последние годы эти работы не ведутся. Такие причины, как необходимость больших рядов наблюдений, невыполнимые требования к характеру экстраполируемого процесса (например стационарность) и др., привели к тому, что экстраполяционные модели (как упомянутые выше, так и другие, описанные в литературе) не получили заметного распространения в практике КППО.

Второй задаче прогнозирования соответствует множество моделей, которые обычно называют причиной-следственными. Мы будем называть их моделями типа "окружающая среда - промысловый объект", чтобы подчеркнуть учет влияния среды на распределение промысловых скоплений объектов и, таким образом, на формирование промысловой обстановки. В дальнейшем внимание будет уделяться только моделям второго типа, так как

возможности экстраполяционного подхода к моделированию динамики промысловой обстановки, по нашему мнению, весьма ограничены.

До наших исследований в литературе был описан *подход к моделированию пространственного распределения вида на основе марковских процессов*. А.А.Проценко и Б.И.Покровский рассмотрели модель блуждания объекта на плоскости с областью, являющейся "притягивающим потенциалом". Однако авторами не уделено внимание конкретному способу задания "притягивающего потенциала". В рамках сделанных предположений дело сводится к решению уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. Для одного частного случая такое решение позволяет утверждать, что с вероятностью 0.95 объект будет блуждать внутри круга радиусом $2\mathcal{G}$, который перемещается на плоскости с определенной скоростью \mathcal{V} . Причем \mathcal{G} и \mathcal{V} являются функциями модуля "притягивающего потенциала". Для конструктивного использования модели необходимо знать вид "притягивающего потенциала", что легко делается с использованием введенного ранее интегрального показателя состояния среды. Нетрудно убедиться, что такой потенциал может быть сконструирован на основе использования видоспецифических функций $\varphi(H)$, где H - интегральный показатель состояния среды.

Более общей моделью, в которой переход особей из точки в точку моделируется формализмом скачкообразного марковского процесса, является модель, предложенная В.Б.Головченко. Изменение числа особей в окрестности точки r при $\Delta t \rightarrow 0$ описывается интегродифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} d\rho(r,t)/dt = & -\rho(r,t)A(r,\rho(t),x(t)) + \\ & + \int_S A(r',\rho(t),x(t))B(r',r,\rho(t),x(t))\rho(r',t)dr'. \end{aligned}$$

Без конкретизации вида функций A и B , определяющих поведение особей, оно в общем виде неразрешимо. Поэтому рассмотрен случай стационарного распределения особей при предположении о стационарности среды:

$$\rho^* = \lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t),$$

которое должно удовлетворять интегральному уравнению

$$\int_S A(r', \rho^*, x) B(r', r, \rho^*, x) \rho^*(r') dr' = \rho^*(r) A(r, \rho^*, x),$$

где x - постоянный по времени фактор детерминированной среды либо постоянное среднее значение стационарной случайной среды.

Далее рассмотрен случай вида особей с групповым образом жизни, к которому относятся и пелагические рыбы - основной объект нашего внимания. При выборе простейших обратных зависимостей подвижности особей от их плотности единственное стационарное решение исходного уравнения находится из несложного алгебраического уравнения и имеет вид:

$$\rho^*(r) = N x(r) / \int_S x(r') dr'.$$

Отсюда следует, что при заданном выше характере поведения вида стационарное распределение особей полностью повторяет распределение фактора $x(r)$. Поделив последнее выражение на N и учитывая, что $S(r)/N = P(r)$, приходим к описанию результатов данной модели через вероятности выбора особями точек акватории S :

$$P^*(r) = x(r) / \int_S x(r') dr'.$$

Чтобы сделать рассматриваемую модель конструктивной и при этом учесть не один, а множество параметров состояния внешней среды, целесообразно в качестве $x(r)$ использовать предложенный интегральный показатель H . Это может быть и некоторая функция $\varphi(H)$, определяющая поведение особей данного вида в зависимости от состояния среды.

Наши исследования позволили предложить еще ряд подходов к моделированию промысловой обстановки. Совместно с С.Б.Паком разработана *энтропийная модель*, которая рассматривает совокупность особей или групп особей (для видов с групповым типом поведения) как статистическую систему. Описанием микросостояния системы назовем вектор распределения особей (групп особей):

$$\vec{N} = \{N_l\} \quad (l=\overline{1, L}, S = \bigcup_{l=1}^L S_l),$$

где N_l - число особей в l -м микроквадрате акватории S . Предположим далее, что группы выбирают какой-либо микроквадрат независимо с вероятностью P_l . При таких предположениях для нахождения вероятности (P) произвольного распределения (N) особей (групп особей) воспользуемся полиномиальной схемой:

$$P(\vec{N}) = N! \prod_{l=1}^L (P_l^{N_l} / N_l!).$$

Назовем $\ln P(\vec{N})$ энтропией нашей системы по аналогии с физической энтропией. Для нахождения наиболее вероятного распределения особей приходим к задаче

$$\ln P(\vec{N}) \rightarrow \max,$$

что с учетом логарифмирования по формуле Стирлинга означает

$$\sum_l N_l \ln(P_l/N_l) \rightarrow \max.$$

Задача решается при ограничениях вида:

$$\sum_l f_l(H_l) N_l = c_l; \quad i=\overline{1, m}; \quad N_l \geq 0, \quad l=\overline{1, L},$$

где c_l - константы, $f_l(H_l)$ - функции от H_l .

В этой модели для учета влияния окружающей среды использован интегральный показатель H . К сожалению, современный уровень изученности процессов формирования распределения рыбных скоплений под воздействием среды не позволяет составить биологически обоснованных содержательных ограничений, за исключением простейшего:

$$\sum_l N_l = N, \quad l=\overline{1, L}.$$

Нетрудно показать, что в этом случае наиболее вероятное распределение по микроквадратам имеет вид:

$$N^*_l = P_l N,$$

или практически в более полезной форме

$$u^*_l = N^*_l / N = P_l.$$

Вектор $\vec{u}^* = \{u^*_l\}$, описывающий в дискретном виде наиболее вероятное распределение особей (групп особей) по микроквадратам района S , назовем вектором распределения промышленного объекта. Введем в рассмотрение функцию $\varphi(H)$ выбора промышленным объектом некоторого значения функционала H . Будем считать, что выбор особями l -го микроквадрата определяется только значением H_l . Тогда вероятность такого выбора можно определить следующим образом:

$$P_l = \varphi(H_l) / \sum_l \varphi(H_l), \quad l = \overline{1, L}.$$

Очевидно, что эта функция должна быть неубывающей, но ограниченной сверху. Наличие величины φ_{max} обусловлено тем, что даже самый благоприятный по условиям среды микроквадрат имеет конечную экологическую емкость. Это связано с существованием внутривидовой конкуренции за ресурсы и жизненное пространство. Приток особей под влиянием благоприятных условий в конечном итоге уравнивается оттоком из-за избыточной концентрации особей в данном месте. Учет зависимости вероятности P_l выбора особями l -го микроквадрата производится в данной модели путем выбора вида функции $\varphi(H)$. Сказанное, а также ряд других физико-биологических соображений позволяют предполагать теоретический вид функции $\varphi(H)$, изображенный на рис. 7, который во многих практических случаях может быть аппроксимирован линейной функцией. Метод оценки линейной аппроксимации функции $\varphi(H)$ на базе уравнения регрессии изложен в восьмом разделе работы.

Таким образом, чтобы использовать на практике данную модель, необходимо получить видоспецифические функции $\varphi(H)$ для каждого объекта промысла. Было показано, что случай выбора $x(r) = H(r)$ в предыдущей модели эквивалентен линейному характеру функции выбора при непрерывной форме записи энтропийной модели.

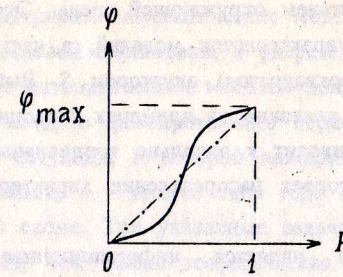


Рис. 7. Теоретический вид функции $\varphi(H)$ и ее линейная аппроксимация.

Под руководством автора С.Б.Паком разработана модель, основанная на уравнении неразрывности. Пусть определена функция $\varphi(r, t)$, которая описывает внешнюю среду в точке r в момент t с точки зрения благоприятности для обитания в ней особей. Если пренебречь процессами гибели и рождаемости, то динамика плотности особей может быть описана известным в гидродинамике уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad \text{где } v = c \text{ grad } \varphi,$$

или $\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\text{div grad } \varphi) \rho + (\text{grad } \varphi \text{ grad } \rho) = 0.$

Последнее уравнение является линейным уравнением 1-го порядка в частных производных, и его решение сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Заметим, что это уравнение можно использовать для моделирования распределения особей, влиянием которых на среду можно пренебречь.

Рассмотренные модели дают представление как о гипотетических механизмах формирования промышленной обстановки, так и о математических методах, которые используются для их описания. Применение адаптивной схемы идентификации моделей позволяет получать решения в условиях стационарной среды в период T_i ($i = \overline{1, m}$) для каждого шага адаптации. Динамика среды при этом учитывается путем "перенастройки" параметров моделей при переходе от T_i к T_{i+1} . Однако, к сожалению, эти модели представляют пока скорее теоретический, чем практический интерес. Существуют две основные трудности применения этих моделей. Первая связана с нехват-

кой экологических знаний о поведении особей и их групп (при групповом образе жизни) под воздействием окружающей среды. Это затрудняет разработку видоспецифических характеристик моделей, в частности функций выбора особями точек (микроквадратов) акватории S . Выбор же простейших функций $\varphi(H)$ как было показано на примерах энтропийной модели и модели марковского типа, приводит к довольно тривиальным решениям, когда распределение особей повторяет распределение характеристики благоприятности условий среды.

Второй трудностью является информационная необеспеченность моделей, ориентированных на описание плотности распределения особей. Она связана с несоответствием распределения особей (или их групп) распределению промысловых характеристик (в частности уловов) на некоторой акватории. Поскольку наблюдаемой величиной являются реальные уловы, то проверка адекватности моделей ведется по этим данным. Но любой специалист, знакомый с рыбным промыслом, знает, что улов в каком-либо месте не является адекватным плотности рыбных скоплений по целому ряду природных, экономических и антропогенных причин. Отсутствие уловов в тех или иных районах также не является достаточным признаком отсутствия в этих районах промысловых скоплений.

Для того чтобы преодолеть указанные трудности помимо рассмотренных, были разработаны и проверены на реальных данных информационно обеспеченные конструктивные способы и модели. Они, во-первых, дают возможность формировать реальные прогнозы на основе концепции адаптивного прогнозирования промысловой обстановки, во-вторых, позволяют получить некоторые оценки функций, описывающих поведение промыслового объекта в зависимости от окружающей среды.

8. Три содержательные задачи КППО и математические методы их решения

Общая задача КППО была разбита нами на три последовательные задачи: 1) выделение в рамках рассматриваемой акватории перспективных для ведения промысла районов, 2) оценка ожидаемых уловов (уловов на судосутки, уловов на промысловое усилие и т.п.) в перспективных районах промысла, 3) определение преимущественных направлений перемещения рыбных скоплений. Эта последовательность задач отражает логику эмпирической разработки краткосрочных промысловых прогнозов, которая базируется на многолетнем опыте. При этом очевидна прагматическая направленность указанных задач. С позиции активной адаптации экспертного опыта в вопросах

прогнозирования вообще, и рыбопромыслового прогнозирования в частности, целесообразно рассматривать математические модели, используемые для прогнозирования промысловой обстановки, в разрезе трех перечисленных задач. Идентификация всех математических моделей должна, как и прежде, производиться либо для каждого фиксированного периода времени T_{qe} (q - индекс биологической ситуации, в которой находится промысловая часть рассматриваемой популяции, e - индекс типа года по термическим условиям), либо по адаптивной схеме. Три указанные задачи являются информационно более обеспеченными, чем общая теоретическая постановка задачи КППО, так как для их решения достаточно данных о состоянии окружающей среды и уловах.

Задача выделения перспективных районов промысла рассматривается как задача распознавания образов. Этот подход оказался наиболее продуктивным и был программно реализован в рамках СОРПУ. На основании анализа существующих классов моделей распознавания образов (модели, основанные на принципе потенциалов; модели, основанные на принципе разделения; модели вычисления оценок; статистические модели) под углом зрения природы процессов формирования промысловой обстановки нами сделан вывод о предпочтительности использования статистических моделей распознавания. Причем, как показали наши исследования, распределения большинства океанологических факторов-признаков весьма далеки от нормального и таковыми предполагаться не могут.

Будем называть *перспективным районом промысла* совокупность микроквадратов сканирования акватории, средний улов (или улов на промысловое усилие) в которых превосходит некоторый заданный уровень. Оптимальное статистическое решающее правило классификации (байесово правило) для простейшего случая выделения двух классов (w_1 - перспективные, w_2 - неперспективные микроквадраты рассматриваемой акватории) и статистически независимых признаков системы описания $X = \{x_k\}$, $k=1, n$ относит микроквадрат акватории к перспективным, если

$$\prod_{k=1}^n p(x_k | w_1) / \prod_{k=1}^n p(x_k | w_2) = \Lambda \geq c_1$$

и к неперспективным в противном случае. При этом процесс обучения сводится к определению по обучающей выборке неизвестных условных плотностей вероятностей и идентификации параметров, задающих порог распознавания c_1 . Для этих целей использовалась собственная непараметрическая оценка.

Представленная модель апробировалась на многолетних материалах промыслов охотоморской сельди, япономорской и южнокурильской сардины и южнокурильской сайры. Ниже приводятся данные только одной серии экспериментов в летний период 1979 г. на промысле сардины в районе Южных Курил. В экспериментах типа i^*i обучение и контроль модели производились по материалам одного и того же i -го эпизода промысла (длительность эпизода 2-4 дня), в экспериментах типа i^*i+1 обучение производилось по материалам i -го, а контроль по материалам $i+1$ -го эпизода. Следует заметить, что эпизоды отстоят друг от друга примерно на декаду. В системе описания состояния среды было 32 океанологических параметра. Было показано, что число признаков в содержательной системе описания (\tilde{n}) может быть уменьшено в полтора раза против числа их в исходной системе (n) практически без потери качества распознавания.

Данные таблицы 1 демонстрируют высокое качество распознавания перспективных районов промысла, а таблицы 2 - хорошие прогностические свойства модели при использовании адаптивной схемы с шагом переобучения, приблизительно равным декаде. Для оценки качества распознавания в экспериментах i^*i и i^*i+1 использованы, кроме универсального критерия Z^*_3 , критерий достоверность распознавания ($D = 1 - P_{ошибки}$) и отношение (K) улова в рекомендованных районах к общему улову за каждый эпизод.

Т а б л и ц а 1

Оценка качества выделения
перспективных районов на промысле сардины
у Южных Курил в 1979 г. в экспериментах i^*i

Показатель качества	Значение показателя качества					Среднее по серии экспериментов
	1*1	2*2	3*3	4*4	5*5	
D	0.87	0.98	0.95	1.00	0.93	0.95
K	0.85	0.61	0.95	0.98	0.98	0.87
Z^*_3	0.72	0.61	0.69	0.75	0.83	0.72

Т а б л и ц а 2

Оценка качества выделения
перспективных районов на промысле сардины
у Южных Курил в 1979 г. в экспериментах $i^*(i+1)$

Показатель качества	Значение показателя качества				Среднее по серии экспериментов
	1*2	2*3	3*4	4*5	
D	0.89	0.70	0.81	0.88	0.82
K	0.59	0.52	1.00	0.47	0.65
Z^*_3	0.57	0.58	0.62	0.58	0.59

Теперь рассмотрим использование интегральной характеристики описания состояния среды в простейшей модели классификации участков акватории на основе порогового правила. Такое правило относит микроквадрат акватории к перспективным (w_1) если $\varphi(H) \geq c_2$ и к неперспективным (w_2) в противном случае. Здесь $\varphi(H)$ некоторая функция состояния среды, в частности, это может быть функция выбора, которая фигурировала при рассмотрении моделей предыдущего раздела. Для случая $\varphi(H) = H$ были выполнены расчеты в сериях экспериментов типа i^*i и i^*i+1 на тех же материалах, что и для байесовой модели (табл. 3 и 4).

Сравнивая качество распознавания перспективных районов по моделям с векторным и интегральным (скалярным) показателями состояния среды на основе данных серий экспериментов, трудно отдать предпочтение какому-либо из них. Этот вывод подтверждается и многолетней эксплуатацией обоих методов в условиях различных промыслов пелагических рыб дальневосточного бассейна.

Методы распознавания образов не вскрывают механизма формирования промысловой обстановки. Их применение основано на констатации наличия различных условий среды в перспективных и неперспективных районах. На этом и базируется прогнозирование промысловой обстановки как определение подмножества микроквадратов, в которых существуют необходимые для образования рыбных скоплений условия среды. Динамика необходимых условий связана с изменениями

преферендума рыб в зависимости от их физиологического состояния и сезонных изменений в деятельном слое океана (для пелагических рыб). Эта динамика учитывается применением адаптивной схемы переобучения моделей распознавания на каждом шаге поступления новой информации о среде и объекте промысла.

Т а б л и ц а 3

Оценка качества выделения перспективных районов у Южных Курил в 1979 г. в экспериментах i^*i с интегральным показателем

Показатель качества	Значение показателя качества					Среднее по серии экспериментов
	1*1	2*2	3*3	4*4	5*5	
D	1.00	0.75	0.95	1.00	0.94	0.93
K	0.81	0.96	0.93	0.99	0.79	0.90
Z* ₃	0.71	0.58	0.77	0.63	0.81	0.70

Т а б л и ц а 4

Оценка качества выделения перспективных районов у Южных Курил в 1979 г. в экспериментах $i^*(i+1)$ с интегральным показателем

Показатель качества	Значение показателя качества				Среднее по серии экспериментов
	1*1	2*2	3*4	4*5	
D	0.94	0.80	0.89	0.86	0.87
K	0.75	0.52	0.89	0.86	0.75
Z* ₃	0.56	0.55	0.70	0.58	0.60

Задача оценки ожидаемых уловов связана с математическим моделированием зависимости улова или улова на промысловое усилие (y) от различных биотических и абиотических факторов окружающей среды (x_k), т.е. с нахождением зависимости

$$y = f(x), \quad x = \{x_k\}, \quad k=\overline{1, n}$$

В реальных условиях ее обычно рассматривают как уточняющую по отношению к задаче выделения перспективных районов. Эта задача решается не для всех микроквадратов акватории S (если рассматривается дискретный относительно пространства подход), а только для тех из них, которые отнесены к классу перспективных. Во многих случаях, особенно когда модели зависимости $y=f(x)$ не являются простыми в вычислительном отношении, такой шаг приводит к экономии времени расчетов на ЭВМ. Кроме того, экспериментальный материал для построения и апробации таких моделей существует, как правило, лишь по перспективным районам, т.е. районам, в которых велся промысел или которые были обследованы флотом в силу их перспективности.

Математическая постановка этой задачи может быть сделана различным образом. В том случае если предполагается наличие статистической связи между уловами (y) в микроквадратах акватории S и несколькими факторами окружающей среды x_k как между случайными величинами, может быть поставлена задача построения многомерной регрессии, например линейной:

$$y = \sum_k a_k x_k + a_{k+1},$$

где a_k ($k=\overline{1, n}$) - параметры, подлежащие оценке по выборочным данным. Исследование уравнения регрессии на практике удобно проводить с позиции дисперсионного анализа. Техника этого дела описана в соответствующей литературе. В общем случае вопрос о значимости уравнения решается на основании общего F -критерия. Сотрудниками ТИНРО О.Н.Фроловым и В.К.Озериним модель многомерной линейной регрессии была исследована на материалах промысла сардины в южнокурильском районе в 1979 г. В качестве независимых переменных использованы рассчитанные по данным фоновой съемки температура воды на стандартных горизонтах, средние вертикальные градиенты температуры слоя между стандартными горизонтами, горизонтальные градиенты температуры на стандартных горизонтах, параметры се-

зонной термоклин, общая биомасса планктона, биомасса зоопланктона общая и по видам - всего 23 признака. Пространство сканировано стандартными микроквадратами 10x10 морских миль. В качестве функции-отклика рассмотрен вылов на усилии.

Уравнение регрессии, содержащее полный набор признаков описания среды ($n=23$), оказалось незначимым. Вывод из исходного уравнения незначимых переменных по алгоритму метода исключения приводит к значимому уравнению регрессии, содержащему только 9 переменных при незначительном снижении коэффициента множественной корреляции. Необходимо отметить, что набор признаков, обеспечивающих значимую связь "среда - улов", не был одинаковым по составу для всех 5 эпизодов промысла в июле-сентябре 1979 г. Это является еще одним подтверждением объективного характера нестационарности значимых факторов-признаков среды, о которой говорилось ранее. Поэтому практическое использование регрессионных моделей возможно лишь при использовании адаптивной схемы.

При разбиении диапазона возможных уловов $[Y_0, Y_{max}]$ (или уловов на промысловое усилие) на непересекающиеся полуинтервалы

$$[Y_{j-1}, Y_j], \quad j=\overline{1, J}, \quad [Y_J, Y_{max}]$$

может быть поставлена задача распознавания микроквадратов по нескольким (J) классам уловов. Таким образом, при соответствующей подготовке исходной информации решается задача распознавания подмножества теперь уже только перспективных микроквадратов. Если микроквадрат попал в класс K_j , то в простейшем случае y полагается ограниченным двусторонним неравенством:

$$Y_{j-1} \leq y < Y_j, \quad j=\overline{1, J}.$$

Рассмотрим результаты исследования линейной одномерной регрессионной модели

$$y_l = a_0 + a_1 x, \quad l=\overline{1, 3},$$

где входная переменная x - это интегральный показатель состояния среды (H), y_l - число промысловых операций, y_2 - вылов, y_3 - улов на промысловое усилие, a_0 и a_1 - неизвестные параметры, оценки которых

находятся с применением метода наименьших квадратов. Техника построения уравнения регрессии указанного вида широко известна. Здесь приводятся данные, полученные нами на материалах сардинового промысла в летний период 1979 г. в южнокурильском районе, которые использовались для ряда уже рассмотренных практических моделей КППО. Для каждого из 3-4 суточных эпизодов серии экспериментов были построены и проанализированы соответствующие уравнения регрессии (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Уравнения линейной регрессии для промысловых характеристик y_1, y_2 и интегрального показателя x ($x = H$) по данным летнего (1979 г.) промысла сардины в южнокурильском районе

Эпизод промысла	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
24 - 26 VII	$y_1 = 16.1 x - 3.4$ $y_2 = 694 x - 172$	0.66 0.60
31 VII - 3 VIII	$y_1 = 34.9 x - 16.5$ $y_2 = 1696 x - 829$	0.75 0.77
9 - 12 VIII	$y_1 = 24.5 x - 9.3$ $y_2 = 991 x - 403$	0.66 0.69
19 - 21 VIII	$y_1 = 39.9 x - 19.7$ $y_2 = 3661 x - 2033$	0.62 0.54
30 VIII - 3 IX	$y_1 = 9.7 x$ $y_2 = 306 x$	0.64 0.64

Для y_1 и y_2 для всех эпизодов серии получены значимые по F -критерию уравнения, а средние по серии коэффициенты корреляции этих величин с x были равны соответственно 0.67 и 0.65. Для y_3 , за исключением одного эпизода, значимых уравнений не получено, поэтому гипотеза о статистической связи между y_3 и x отвергается. Обнаруженные связи для y_1 и y_2 не являются стационарными, они меняются от эпизода к эпизоду (это подтверждается рассмотрением аналитических выражений регрессий и их графиков). Попытка построить единое уравнение регрессии для всего рассмотренного периода промысла приводит к снижению коэффициентов линейной корреляции между y_1, y_2 и x до 0.58 и 0.56 соответственно. Поэтому при практическом использовании для целей КППО данной модели нами, как обычно, используется принцип адаптивной идентификации, реализованный

средствами СОРПУ. При использовании степенной регрессионной модели вместо линейной коэффициенты корреляции между y_1 , y_2 и x в среднем по серии эпизодов увеличиваются на 0.04. Однако при этом на 12-15 % возрастает величина среднеквадратического отклонения теоретического ряда значений уравнения от эмпирического (ошибка уравнения). В связи с этим был сделан выбор в пользу линейных уравнений регрессии с интегральным показателем состояния среды для решения второй содержательной задачи КППО.

Нами изучался также вопрос о зависимости качества статистической связи между величинами y_1 , y_2 и x от информационного уровня (η) интегрального показателя среды H или, другими словами, от состава и числа признаков описания среды, используемых в этом показателе. В пределах варьирования в разумных пределах (от 100 до 60 % количества информации, заключенной в исходной системе описания среды) такая зависимость не обнаружена. Это позволяет в случаях дефицита времени для расчетов в данной модели использовать показатель H , определенный по содержательной системе описания среды.

Необходимо также отметить следующее. При рассмотрении моделей распределения рыб, основанных на принципе максимума энтропии, марковских процессах, уравнении неразрывности, как было показано ранее, особо важную роль играют функции выбора $\varphi(H)$. Получение видоспецифических оценок этих функций, как отмечалось, затруднено отсутствием информации о реальном распределении особей (или групп особей) по акватории промысла. Вопрос о соответствии распределения уловов распределению особей в настоящее время, к сожалению, биологически строго не обоснован. Тем не менее при хорошем охвате района поисковыми работами и достаточном количестве добывающих судов имеются предпосылки для оценивания $\varphi(H)$ на основании данных о распределении уловов. В частности, для этого нами использовалась линейная регрессионная модель зависимости уловов от интегрального показателя состояния среды H . Таким образом, с одной стороны, эта модель служит для решения практической задачи об оценке ожидаемых уловов в каждом перспективном микроквадрате акватории, с другой, - используется для идентификации моделей общей задачи КППО.

Задача определения направлений перемещения перспективных районов является уточняющей по отношению к первым двум практическим задачам КППО, что следует из самого ее названия. Ее решение дает возможность, выделив перспективные районы промысла, определить пространственную тенденцию их перемещений в рамках периода действия КППО. Это в

свою очередь позволяет более эффективно организовать поиск скоплений рыбы и их облов. Для этих целей была предложена модель, которая реализует гипотезу о важнейшей роли градиентов внешних условий для перераспределения скоплений рыб, а следовательно, и районов лова. Естественно считать, что если значения признаков системы описания $X=\{x_k\}$, $k=\overline{1,n}$ некоторого благоприятного района обитания рыбы (перспективного района промысла) не меняются или меняются незначительно в рамках этого района, то промысловая обстановка в нем стабильна. Перемещения косяков рыбы в стабильном районе носят стохастический характер, напоминающий броуновское движение. Движения косяков приобретают определенную тенденцию, обусловленную пространственным изменением факторов, влияющих на миграцию рыбы. Будем называть эту пространственную тенденцию стохастических перемещений косяков рыбы преимущественным направлением миграций. При качественных исследованиях системы "среда - промысловый объект" стремятся выделить один главный фактор среды и связать с ним динамику промысловой обстановки. Количественные исследования показывают, что часто одновременно действуют несколько "главных" факторов, определяющих миграции. Поэтому для описания влияния на миграции группы факторов можно использовать какой-либо обобщенный показатель. Это может быть аддитивная или мультипликативная свертка. Показано, например, что для этих целей весьма полезным и удобным является интегральный показатель состояния среды H .

Рассмотрим в рамках традиционной акватории обитания промыслового объекта район промысла в определенный момент времени. Найдем центр тяжести такого района как центр тяжести плоской фигуры с переменной плотностью. Эту плотность ассоциируем с величиной улова на промысловое усилие.

Определим величины приращений H на каждом отрезке, соединяющем центр тяжести района с центром граничных микроквадратов района промысла:

$$g_j = (H_j - H_0) / r_{0j},$$

где r_{0j} - расстояние между центром тяжести района и центрами граничных микроквадратов района, H_0 и H_j - значения H в этих точках ($j=\overline{1,J}$, J - число граничных микроквадратов района). Введем в рассмотрение векторы \vec{g}_j , имеющие модули $|\vec{g}_j|=g_j$, которые направлены к центру тяжести района вдоль отрезка, соединяющего его с центром j -го микроквадрата при $g_j < 0$ (векторы притока) и от этой точки при $g_j > 0$ (векторы оттока). Произведя

раздельно суммирование этих групп векторов, получим главные направления подхода (\bar{g}^-) и отхода (\bar{g}^+) скоплений рыбы относительно центра тяжести района. Взаимное расположение векторов \bar{g}^- и \bar{g}^+ характеризует преимущественные направления миграций рыбных скоплений.

Назовем *параметром изменчивости промысловой обстановки* величину

$$g = \left| \bar{g}^- \right| = \left| \bar{g}^- + \bar{g}^+ \right|.$$

В том случае, если модуль вектора g равен 0, обстановка в районе стабильна. Это означает, что миграции рыб в пределах района носят чисто стохастический характер. При этом возможны два случая: либо векторы \bar{g}^- и \bar{g}^+ лежат на одной прямой и равны по модулю (тогда сколько рыбы вошло в район, столько и ушло из него, а район при этом не смещается и не меняется по уловистости), либо $\bar{g}^- = \bar{g}^+ = 0$ (тогда скопления не подходят к району и не выходят из района).

Построим следующую модель пространственной динамики фиксированного района:

$$v(t) = f(g(t)),$$

где v - скорость смещения центра тяжести района промысла. В качестве зависимости $v = f(g)$ целесообразно принять функцию вида, приведенного на рис. 8, или ее кусочно-линейную аппроксимацию.

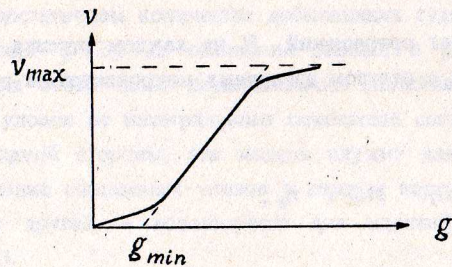


Рис. 8. Зависимость скорости смещения (v) промыслового района (центра его тяжести) от величины параметра изменчивости промысловой обстановки (g)

Действительно, можно предполагать, что при незначительной неоднородности окружающей среды по N у промыслового объекта нет стимула перемещаться целенаправленно. Необходимо некоторое пороговое значение градиента N , которое может быть воспринято сенсорной системой объекта как команда к началу направленных миграций в сторону улучшения условий. Это пороговое значение должно выделяться по величине на фоне флуктуаций квазиизотропного поля N . С другой стороны, существует предельная скорость перемещения отдельной особи, наличие которой приводит к существованию максимально возможной скорости передвижения скоплений. Этим объясняется наличие насыщения кривой $v = f(g)$. Между двумя критическими значениями - минимально необходимым для начала движения (g_{min}) и соответствующим максимальной скорости перемещения скоплений (g_{max}) - лежит область, в пределах которой без больших натяжек скорость перемещения центра тяжести скопления (или промыслового района) можно считать пропорциональной величине g . Область значений $g < g_{min}$ будем называть *областью стабильности промысловой обстановки*.

Таким образом, каждый промысловый район, существующий на рассматриваемой акватории, может быть исследован на стабильность обстановки в нем. Вычислив величину изменчивости промысловой обстановки, можно определить, попадает ли она в область стабильности. Если да, то в период квазистационарной ситуации в среде (период действия инерционных прогнозов КППО) район не должен существенно изменять своего местоположения и характеристик уловистости. Если нет, т.е. если $g > g_{min}$, то построенная модель позволяет вычислять перемещения промыслового района от момента t на некоторое Δt вперед при условии, что Δt не превосходит величину периода квазистационарного состояния в окружающей среде. Из-за смены предпочтений рыб, т.е. потому что отношения "окружающая среда - промысловый объект" меняются в течение годового цикла, к этой модели, как и ко всем другим, применяется концепция адаптивной идентификации.

Отметим еще одну более сложную аналитическую модель, развивающую изложенные выше идеи о механизмах перемещения сформировавшихся перспективных районов промысла. *Диффузионная модель* реализует гипотезу о том, что при наличии пространственной неоднородности среды на фоне стохастических движений промыслового объекта появляется тренд - преимущественное направление миграций, обусловленное этой неоднородностью. Основываясь на этой гипотезе и высказанных ранее предположениях о характере изменения промысловой обстановки, автором в содружестве с М.Руохо-

неном предложено для вычисления местоположения Y рыбного скопления в момент времени t использовать модель на основе стохастического дифференциального уравнения Ито. Впоследствии нами был применен принцип адаптации модели к текущему состоянию в системе "среда - промышленный объект". Это позволило перейти к рекурсивной процедуре для конструктивного определения $Y(t)$ в пределах периода T_i "эволюционного развития" промышленной обстановки:

$$Y(t) = Y(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^t a_i(Y(s), s-t_{i-1})ds + \int_{t_{i-1}}^t b_i(Y(s), s-t_{i-1})dw(s-t_{i-1}), \quad t \in T_i \subset T_q, \quad i=\overline{1, m}, \quad q=\overline{1, Q},$$

где a - функция дрейфа, b - диффузионная функция, w - двумерный стандартный винеровский процесс. Для практического применения диффузионной модели нужно уметь вычислять оценки функции дрейфа и диффузии.

Для оценки функции дрейфа использован подход, примененный нами ранее и основанный на определении векторов притока и оттока. М.Руохонен предложил для независимой от времени диффузионной функции оценку специального вида, которая может быть использована в конкретных расчетах. Однако это требует дополнительных биологических исследований, подтверждающих сделанные формальные ограничения характера процесса диффузии.

Многолетний практический опыт краткосрочного рыбопромышленного прогнозирования показывает, что если получено решение всех трех практических задач КППО, то этой информации достаточно, и во многих случаях с избытком, для принятия решений об оперативном управлении промыслом. Часто для принятия таких решений достаточно уже решения первой задачи. В рамках СОРПУ реализованы возможности решения всех трех перечисленных задач КППО. В зависимости от наличия входной информации, нужд промысла, опыта пользователя СОРПУ, требований оперативности с помощью данной системы производится прогнозирование промышленной обстановки.

9. Прогнозирование промышленной обстановки по комитету моделей-экспертов

Моделирование отношений "окружающая среда - промышленный объект" и прогнозирование на этой основе промышленной обстановки реализуются в СОРПУ в подсистеме выработки прогностических решений. Исходная позиция ее разработки состоит в том, что для описания сложных явлений разрабатывается не одна, а набор моделей, имеющих в своей основе различные предпосылки и использующих различный математический аппарат. В данной подсистеме реализуется принцип библиотеки моделей прогнозирования промышленной обстановки, которые позволяют решать основные задачи краткосрочного рыбопромышленного прогнозирования с помощью ЭВМ. Однозначно выбрать одну наилучшую во всех отношениях модель (удобство эксплуатации, качество результатов, применимость к различным промышленным объектам или одному объекту в различные периоды годового цикла) практически невозможно. С другой стороны, результаты выделения множества перспективных микроквадратов промышленного района показывают, что качество такого выделения на основе *обобщенного решения* по нескольким моделям зачастую выше качества выделения с помощью отдельных моделей.

В простейшем случае вопрос об отнесении микроквадратов акватории к классу перспективных и неперспективных на основе взвешивания решений разных алгоритмов классификации может быть решен с использованием процедуры голосования. В этом случае микроквадрат считается перспективным, если отнесен к этому классу простым большинством или большинством заданного уровня голосов алгоритмов. В общем же случае, как в задаче выделения перспективных районов, так и в определенных ситуациях, для двух других основных задач КППО при использовании библиотеки моделей возникает проблема взвешивания решений отдельных моделей и формирования на их основе обобщенного решения. Представляется целесообразным использовать опыт, накопленный при обработке мнений группы или, как еще говорят, комитета экспертов. В такой постановке вопроса речь идет о выработке обобщенного решения группы или *комитета моделей-экспертов*, где решения, полученные по отдельным моделям, будут представлять собой "мнения" отдельных членов комитета.

Наиболее распространенные методы интегрирования экспертных оценок, которые могут быть применены для выработки результирующих оценок по комитетам моделей решений задач КППО, - это методы простого и статистического ранжирования, а также парных сравнений. Если использовать 3 названных способа свертки экспертных оценок, то в результате получится 3

варианта обобщенного решения-прогноза по комитету моделей. Обозначим их соответственно R_1 , R_2 и R_3 . В постановке задачи, которую назовем прямой, при формировании оценок R_1 , R_2 и R_3 веса "компетентности" отдельных моделей-экспертов принимаются одинаковыми. Тогда в качестве решения задачи КППО может быть принята любая из оценок R_1 , R_2 , R_3 . Однако остается открытым вопрос о качестве такого решения. Поэтому нами предлагается следующий шаг. На основе $\{R_1, R_2, R_3\}$ строится результирующий вектор R_0 методом простого ранжирования.

Путем решения обратной задачи можно оценить качество каждого метода свертки экспертных мнений и каждой модели-эксперта. Для этого понадобятся реальные данные, характеризующие промышленную обстановку в микроквadrатах рассматриваемого района. Эти данные считаются достоверными. Они могут быть получены на основе статистики промысла или гидроакустического исследования района. Если наилучшее качество оценки промышленной обстановки на известном материале дает одна из моделей-экспертов, то ее и следует использовать для прогнозирования. Если же такая наилучшая оценка получена на основе одного из четырех способов свертки экспертных мнений, то следует провести пересчет весов моделей-экспертов по специальным формулам и повторить решение прямой задачи с измененными весами по наилучшему методу свертки. Понятно, что возможна серия подобных итераций.

Сделаем два практических замечания. Во-первых, следуя концепции адаптивной идентификации моделей КППО, необходимо повторять рассмотренные процедуры изучения качества сверток решений по моделям-экспертам на каждом шаге адаптивной схемы. Во-вторых, в случае отсутствия необходимой информации или достаточного времени для подобного исследования мы использовали на практике простую процедуру голосования для выработки обобщенного решения (прогноза) по комитету моделей-экспертов для каждой из трех практических задач КППО. В частности, для первой задачи КППО (этот случай нами исследован на достаточном материале) качество выделения перспективных районов по комитету из трех моделей в среднем на четверть лучше качества выделения их по отдельным моделям.

10. Программная реализация СОРПУ

В 1985 г. под руководством автора была завершена разработка человеко-машинной системы для целей краткосрочного прогнозирования промышленной обстановки. Эта система была технически реализована средствами ЭВМ

СМ-4 и создавалась как диалоговая, позволяющая сочетать преимущества формальных методов анализа и прогнозирования с опытом гидрологов и биологов - специалистов в области экспертного прогнозирования промышленной обстановки. Версия СОРПУ для персонального компьютера типа IBM AT была закончена в 1989 г. и также имеет диалоговый подход к организации ее эксплуатации. При разработке данной версии системы с самого начала, кроме ее промышленно-прикладного предназначения, имелись в виду еще два аспекта ее использования. Это, во-первых, использование достаточно мощных и гибких возможностей этой диалоговой системы в качестве инструментария при изучении в океане отношений "окружающая среда - промышленный объект". Такая система является базовым математическим обеспечением системного подхода к проблеме краткосрочного рыбопромышленного прогнозирования в целом. Во-вторых, подобная система может быть использована в качестве тренажера для специалистов, занимающихся непосредственным обслуживанием рыбной промышленности рекомендациями о промышленной обстановке.

Для нормальной работы программного обеспечения системы необходима следующая минимальная комплектация компьютера: процессор (8086, 80286), адаптер (EGA, VGA), монитор (EDC). Требования, предъявляемые к памяти: 450 Кбайта свободной памяти в ОЗУ, 3 Мбайта свободной памяти на жестком диске. Версия СОРПУ для персонального компьютера функционирует на базе MS-DOS и обеспечивает:

- работу (ввод, контроль, хранение, первичную обработку) с ретроспективными и оперативными данными о состоянии окружающей среды (включая и дистанционные) и результатах промышленной деятельности судов добывающего и поискового флота;
- восстановление (интерполяцию) полей измеряемых и расчетных океанологических и метеорологических параметров;
- анализ данных промышленной статистики и гидроакустического поиска;
- вычисление экологической значимости и информативности параметров описания среды;
- вычисление интегральных характеристик среды;
- выделение перспективных районов промысла на основе различных методов;
- оценку преимущественных направлений смещений и уловистости перспективных районов промысла;
- оценку качества прогнозов промышленной обстановки и выполнение ряда других проблемно-ориентированных функций.

Все входные документы и промежуточные результаты представляются в цветном графическом режиме на экране дисплея, а также в цифровом и графическом режиме на принтере (рис. 9-12).

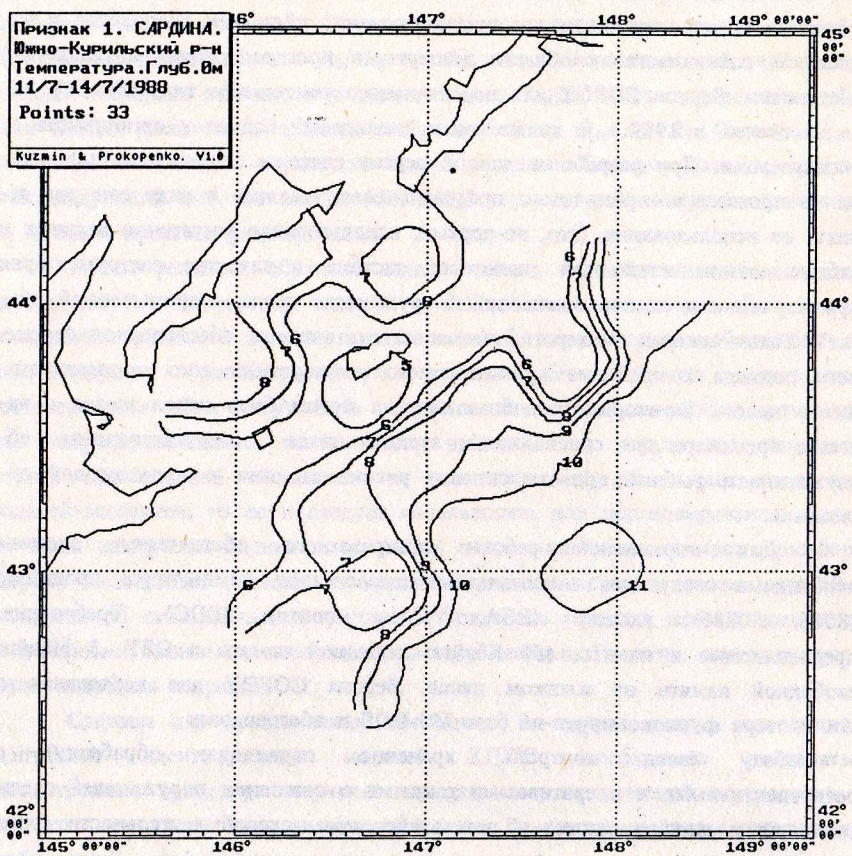
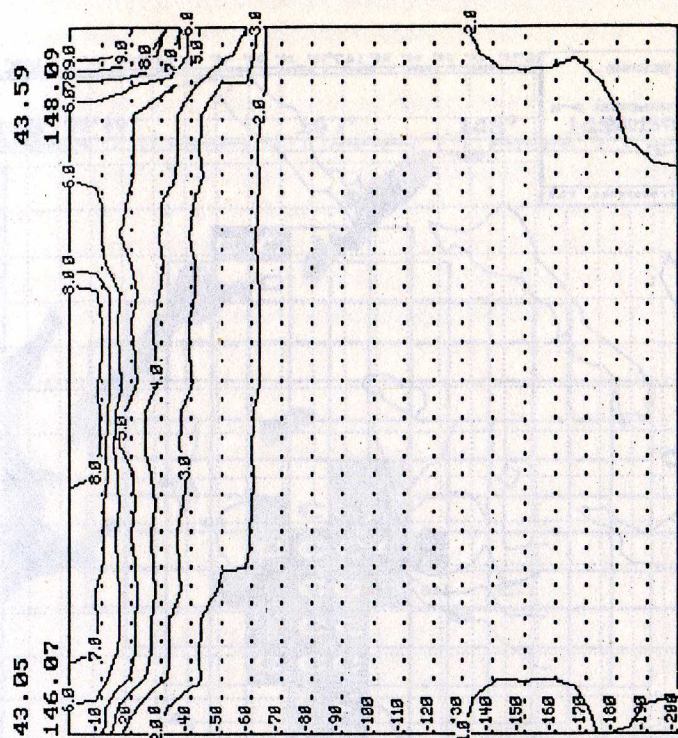


Рис. 9. Пример выходного документа СОРПУ
(распределение температуры поверхности океана)



Сардина-88 Южно-Курильский район
Фоновые данные : 11/7 - 14/7

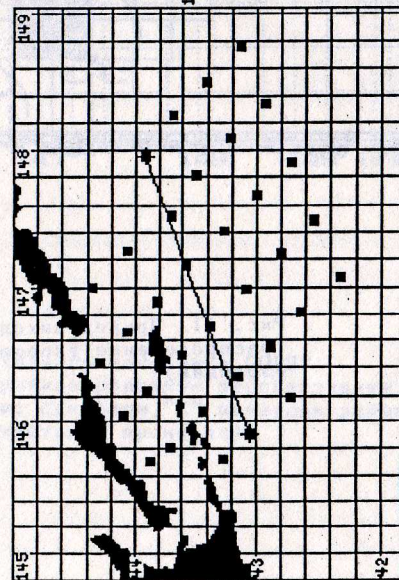


Рис. 10. Пример выходного документа СОРПУ
(вертикальное распределение температур
воды по выделенному разрезу)

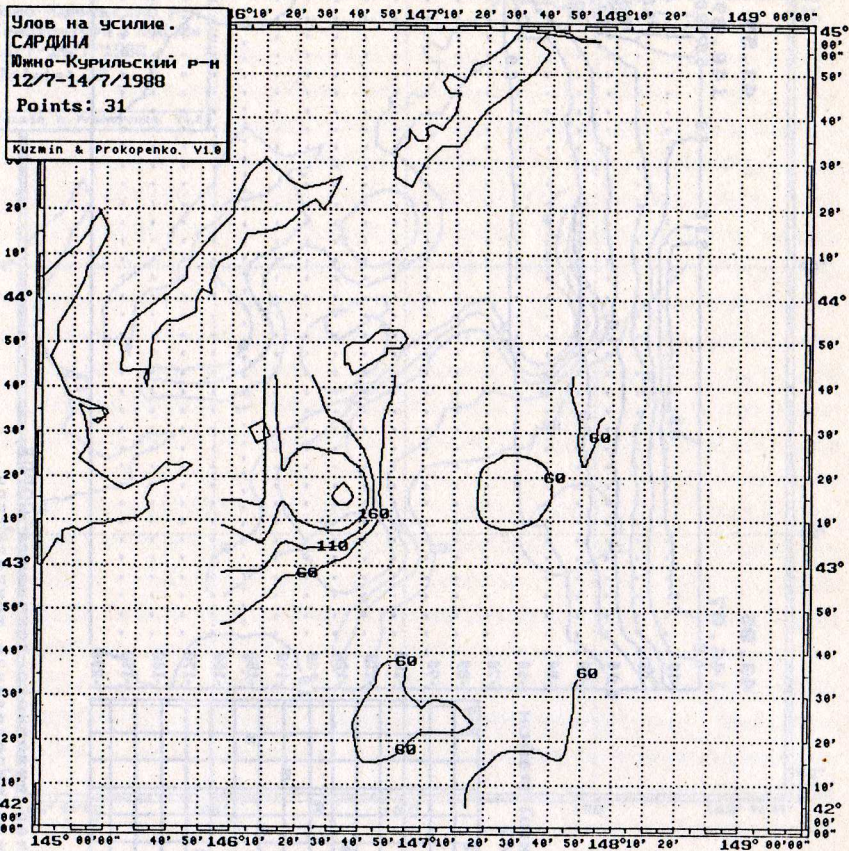


Рис. 11. Пример выходного документа СОРПУ
(распределение уловов на усилие в виде
изолиний)

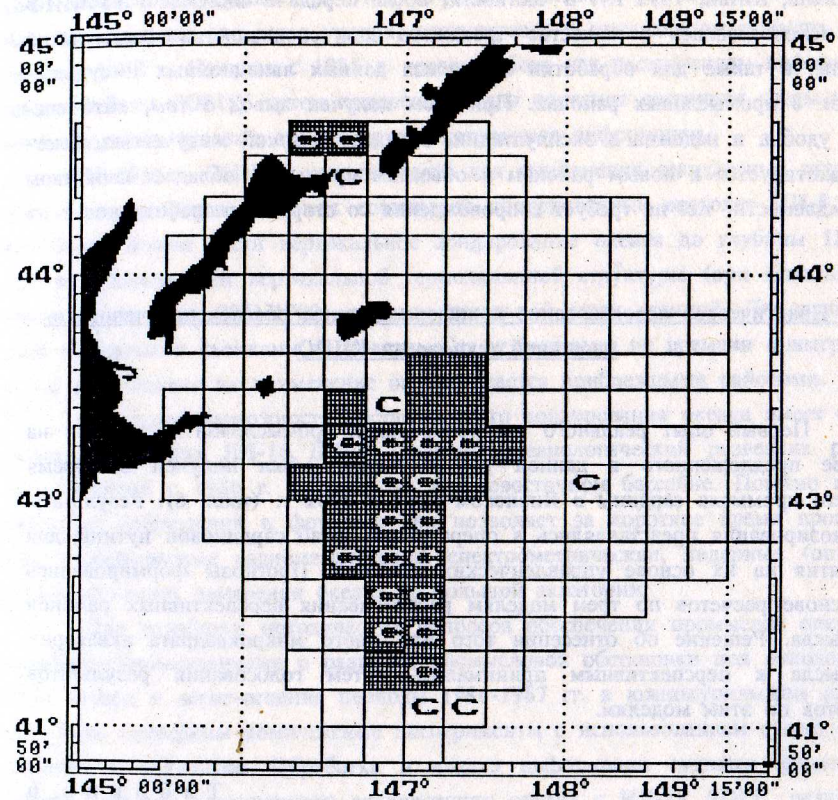


Рис. 12. Пример выходного документа СОРПУ
(заштрихованы - спрогнозированные перспективные
для промысла районы; символом "С" помечены районы,
подтвержденные статистикой промысла)

Версия СОРПУ для персонального компьютера после соответствующего обучения персонала передана для эксплуатации в ПО "Дальрыба" (1990 г.), ТУРНИФ (1990 г.), Национальный центр мониторинга морской среды (г. Далянь, Китай, 1992 г.). В частности, после передачи системы в ТУРНИФ она использовалась в качестве тренажера для специалистов флагманской группы, а также для обработки и анализа данных авиационных и судовых съемок в промысловых районах. При этом получен вывод о том, что система удобна и надежна в эксплуатации, обладает высокой живучестью, быстро адаптируется к новым районам и объектам промысла, обладает свойством отчуждаемости, т.е. не требует сопровождения со стороны разработчиков.

11. Практическое использование и информационное обеспечение человеко-машинной технологии КППО

Первый опыт реального прогнозирования промысловой обстановки на основе предложенного в данной работе подхода был получен во время летнего промысла сардины в Японском море в 1982 г. (табл. 6). Результаты прогнозирования представлялись в оперативный штаб сардиновой путины для принятия на их основе управленческих решений. Прогнозы формировались на основе расчетов по трем моделям распознавания перспективных районов промысла. Решение об отнесении того или иного микроквадрата акватории промысла к перспективным принималось путем голосования результатов расчетов по этим моделям.

Т а б л и ц а 6

Оценка качества краткосрочных прогнозов промысловой обстановки в япономорском районе в 1982 г. на промысле сардины
(1-4 - номера прогнозов)

Показатель качества	Значение показателя качества				Среднее по серии прогнозов
	1	2	3	4	
K _*	0.79	0.88	0.99	0.82	0.87
Z ₃	0.5	0.53	0.73	0.64	0.6

В последующие годы эти работы были распространены кроме япономорского на южнокурильский район. Информационной основой описания состояния среды служили регулярные фоновые съемки, выполняемые группой научно-поисковых судов. При этом качество прогнозов перспективных районов, как правило, не ниже уровня, достигнутого в приведенном примере по данным 1982 г. Начиная с 1985 г. велась работа над расширением информационной базы СОРПУ путем привлечения для описания состояния среды помимо фоновых судовых съемок других источников информации.

С 1985 г. ТИНРО использовался для выполнения стандартных гидрологических разрезов и съемок специально оборудованный вертолет МИ-8. С его борта можно вести вертикальное зондирование океана до глубины 150-200 м с измерением вертикальной термохалинной структуры (при использовании зонда типа STD-1000) в узлах детальной сетки станций. По сравнению с судовыми съемками вертолетные дают выигрыш во времени примерно в 4-5 раз. Однако их применение ограничивается прибрежными районами.

Широкие возможности дистанционного зондирования океана имеет самолет-лаборатория ИЛ-18 ДОРР (дальний океанологический разведчик рыбы), который с 1986 г. работает на дальневосточном бассейне. Помимо визуальных наблюдений и фоторабот он позволяет за короткое время проводить инфракрасные радиометрические, спектрометрические, лидарные (оптическая локация) измерения океана на большой акватории.

Для отработки методических вопросов обеспечения промыслов оперативными рекомендациями о развитии промысловой обстановки под руководством автора в летне-осенние периоды 1986-1987 гг. в южнокурильском районе были проведены комплексные эксперименты с использованием судов, самолетов и спутников. Обработка и анализ информации судовых фоновых съемок, данных авиационного зондирования океана с ИЛ-18 ДОРР, результатов работы добывающих судов сайровой и сардиновой экспедиций проводились на основе расчетов СОРПУ. Она использовалась, когда это было возможно, и для прогностических целей. Так, в начале сентября 1987 г. на промысле сайры сложилась тяжелая промысловая обстановка. Сделанные с помощью СОРПУ на основе океанологической информации прогнозы позволили рекомендовать добывающему флоту район, далекий от традиционных мест отечественного промысла этого объекта. Поисковыми судами экспедиций в этом районе были обнаружены скопления рыбы, и добывающий флот имел здесь за ночь уловы до 500-700 т.

Уникальные перспективы для использования СОРПУ открылись с появлением в арсенале рыбохозяйственной науки судов типа "Атлантик-833" с бортовой ЭВМ СМ-1420 (именно на этот тип ЭВМ была рассчитана моди-

фикация СОРПУ образца 1985-1988 гг.). Появилась возможность на базе этих судов создать в наиболее важных промысловых районах судовые центры сбора, обработки данных и прогностического обслуживания промыслов. В 1988 г. НИС "Профессор Леванидов" в районе Курильских островов впервые выполнял роль такого центра сразу для двух экспедиций - сайровой и сардиновой. Автор являлся начальником этой экспедиции. В период рейса средствами СОРПУ сделано более двух десятков 3-5-суточных прогнозов как по судовым, так и по авиационным данным, которые передавались с ИЛ-18 ДОРР на борт судна по факсимильному каналу связи. При использовании судовых данных система описания состояния среды содержала 45 признаков-параметров, а при использовании авиационных - четыре дистанционных параметра (температура поверхности океана (ТПО) и три спектрометрических индекса). Качество прогнозов по критерию Z^* для серии, основанной на судовых данных, составило величину 0.62, а для серии, основанной на дистанционных измерениях, - 0.53. Такое качество является весьма высоким и, как показывает опыт, вполне достаточным для практических целей. Это подтверждается тем, что по множеству всех сделанных прогнозов от 65 до 89 % уловов было взято в рекомендованных районах промысла.

Начиная с 1989 г., после окончания работ по созданию версии СОРПУ для персонального компьютера, эта система использовалась во многих научно-исследовательских рейсах, где сотрудниками ТИНРО и ТУРНИФ особенно широко эксплуатировались возможности системы по обработке и графическому представлению океанологических и промыслово-биологических данных.

Используя исследовательские возможности версии СОРПУ для персонального компьютера, на основе накопленных данных был получен ряд полезных в практическом отношении результатов. Изучение суточной динамики разницы судовой и авиационной ТПО позволило разработать способ оценки среднего суточного хода ТПО для района выполнения соответствующих съемок. Например, для района, примыкающего к Южным Курилам, во второй половине июля он оценен величиной $+0.5^\circ\text{C}$. Данные квазисинхронных авиационных и судовых съемок и их совместная обработка позволили оценивать среднюю погрешность самолетного ИК-радиометра, причем установлена зависимость этой погрешности от того, в высоко или низкоградиентных зонах поля ТПО производятся измерения. Исследована экологическая значимость (полезность для целей КППО) дистанционных характеристик, измеряемых ИЛ-18 ДОРР.

Получен и обработан массовый материал о распределении многочисленных признаков описания состояния среды по судовым данным как для перспективных, так и неперспективных районов промысла.

Таким образом, многолетние данные экспериментального практического использования СОРПУ в различных районах на промыслах разных видов пелагических рыб (в частности, сардины, сайры, сельди) подтверждают хорошие прогностические качества положенных в основу СОРПУ математических моделей КППО, эффективность предложенных методов обработки и анализа данных, а также идентификации моделей по адаптивной схеме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Технология системного анализа, как показано в диссертации, является эффективным инструментом объединения усилий и результатов комплексных исследований закономерностей формирования промысловой обстановки. Это позволило создать единую научную концепцию краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования на базе интерактивной информационно-вычислительной системы.

2. Разработанные методы описания состояния окружающей среды, результатов промысла, биосостояния промысловых объектов, а также способы подготовки, обработки и анализа экспериментального материала универсальны в смысле их применимости к различным пелагическим объектам. Расчетами по многолетним данным различных промыслов доказана необходимость использования векторного и интегрированного описания состояния среды в задачах КППО.

3. Обнаруженная и количественно изученная динамика информативности (экологической значимости) признаков векторного описания состояния среды является отражением изменчивости взаимосвязей в системе "окружающая среда - промысловый объект". Эта изменчивость обусловлена сезонными трендами состояния деятельного слоя океана, с одной стороны, и динамикой биосостояния промысловых объектов, - с другой. Для учета этих важнейших эффектов в работе предложена и обоснована адаптивная схема идентификации моделей, апробация которой на реальных материалах позволила обосновать выбор временного шага адаптации и пределы периода действия прогнозов промысловой обстановки.

4. Проблема краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования раскладывается на три содержательные задачи: выделение перспективных районов промысла, оценка в них возможных уловов, определение главных направлений миграций. Для каждой из указанных задач разработаны математические модели и методы решения. Опыт многолетней эксплуатации ряда информационно-обеспеченных моделей позволил составить из них

библиотеку методов компьютерной системы для КППО. Предложен ряд математических моделей решения задач КППО в общей постановке. Проведено их исследование и сравнение.

5. Качество прогнозов промысловой обстановки, как правило, повышается при учете результатов прогнозирования, полученных с помощью разных математических моделей. Для этих целей предложен и апробирован подход к выработке прогнозов, основанный на использовании комитета моделей.

6. Наряду с оценками качества, присущими отдельным классам математических моделей, при системном анализе проблемы КППО на разных этапах необходимо обращаться к универсальным, независящим от метода критериям качества прогнозов. Система таких универсальных критериев качества разработана в диссертации.

7. Программная реализация концепции и результатов диссертации выполнена в виде двух версий диалоговой системы оперативного рыбопромыслового прогнозирования и управления (СОРПУ) для ЭВМ типа СМ-4 (1420) и персональных компьютеров IBM XT/AT. Вторая версия не только позволяет почти на порядок сократить время расчетов, но и предоставляет пользователю мощные графические средства, что особенно важно в рассматриваемой предметной области, а также "дружественный" компьютерный сервис.

8. Вычислительные и сервисные возможности СОРПУ в сочетании с созданными базами данных позволяют использовать СОРПУ помимо ее основного предназначения, во-первых, как эффективный инструмент исследования закономерностей в системе "окружающая среда - промысловый объект" и, во-вторых, как тренажер для специалистов, занимающихся краткосрочным промысловым прогнозированием.

9. Человеко-машинная технология сбора, обработки и анализа всех применяемых в промысловом прогнозировании данных отработана как в береговых условиях, так и в условиях судового информационно-прогностического центра. Для обеих версий СОРПУ разработаны методические рекомендации по практическому использованию.

10. Показана практическая возможность формирования прогнозов промысловой обстановки с помощью СОРПУ на базе исключительно дистанционного зондирования океана средствами самолета-лаборатории ИЛ-18 ДОРР. Качество таких прогнозов в среднем в 1.2 раза ниже (по универсальному Z^* -критерию) качества прогнозов, основанных на судовых фоновых съемках.

11. Разработанные в диссертации методы и модели, их программная реализация, организационно-информационное обеспечение проверены на

многолетних реальных данных промыслов сардины в южнокурильском и япономорском районах, а также сайры в районе Курильских островов. Уловы в рекомендованных районах по множеству сделанных прогнозов составляли 65-89 % от общего вылова за период действия прогноза.

12. Выполненные исследования и полученные результаты с учетом современных тенденций отечественного промысла (насыщение вычислительной и поисковой техникой, океанологическим оборудованием, а также появление нового поколения научно-исследовательских судов и широкое использование дистанционных методов изучения океана) позволяют поставить вопрос о создании в системе рыбной промышленности бассейновых служб прогнозов промысловой обстановки. Такие службы должны целенаправленно объединить усилия всех организаций, причастных и заинтересованных в этой проблеме.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бочаров Л.Н. Статическая модель процесса принятия решений по расстановке добывающего флота // Прикладные методы исследования процессов принятия решений. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 130-134.
2. Бочаров Л.Н. Динамическая модель процесса определения оптимального порядка работы транспортного судна // Динамические модели процессов принятия решений. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 143-148.
3. Трухаев Р.И., Хоменюк В.В., Бочаров Л.Н., Чемерис М.Б. О чувствительности байесовских решений в случае векторного оценочного функционала // V совещание по теории инвариантности и ее применениям: Тез.докл. Киев: ИК АН УССР, 1976. С. 50.
4. Хоменюк В.В., Трухаев Р.И., Лысенко Н.И., Бочаров Л.Н. Модель оптимального направления рыбы-сырца в обработку для БМРТ // Рыб. хоз-во, 1976. N 7. С. 82-83.
5. Бочаров Л.Н. О построении полезности признаков объектов классификации по конечной обучающей выборке // Динамика вязкой жидкости. Измерение параметров состояния сложных систем. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 11-15.
6. Бочаров Л.Н. Математическая модель краткосрочного прогнозирования обстановки рыбного промысла // Ж. вычислит.мат. и мат.физ., 1978, т. 18, N 5. С. 1291-1299.

7. Бочаров Л.Н. Модель принятия решений о выборе перспективных районов рыбного промысла // Модели процессов принятия решений. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 128-145.
8. Бочаров Л.Н., Озерин В.К., Павлович В.В. Исследование информативности факторов внешней среды, обуславливающих промысловую обстановку // Рыб.хоз-во, 1978. N 5. С. 84-87.
9. Bocharov L.N. Models of operative fishery forecast // IFIP TC-7. Working conference on Modelling and Optimization of Complex Systems. Abstracts, Novosibirsk, 1978. P. 77-91.
10. Bocharov L.N. Operative fishery forecast problem. Turku, Univ.of Turku, 1979. 32 p.
11. Бочаров Л.Н., Золотов Е.В., Пундалов Б.Н. Система оперативного прогнозирования промысловой обстановки с помощью ЭВМ // XIV Тихоокеан.науч.конгресс, секция F-Ш. М., 1979. С. 23-25.
12. Бочаров Л.Н. Математическое прогнозирование промысловой обстановки. Диффузионная модель движения рыбных скоплений // Прогнозирование и распознавание образов. М.: ВЦ АН СССР, 1980. С. 12-17.
13. Бочаров Л.Н. Об экономической эффективности методик краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования // Экономико-математические методы планирования и управления в рыбной промышленности дальневосточного бассейна. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 31-45.
14. Бочаров Л.Н. Краткосрочное рыбопромысловое прогнозирование. Системный анализ проблемы // Математические методы исследования процессов формирования промысловой обстановки. Владивосток, ТИНРО, 1982. С. 3-25.
15. Бочаров Л.Н. Экологически значимое описание состояния внешней среды // Математические методы исследования процессов формирования промысловой обстановки. Владивосток: ТИНРО, 1982. С. 78-94.
16. Бочаров Л.Н., Пак С.Б. Энтропийная модель распределения скоплений животных // Математические методы исследования процессов формирования промысловой обстановки. Владивосток: ТИНРО, 1982. С. 95-108.
17. Бочаров Л.Н. Математическое моделирование распределения промысловых рыб в зависимости от условий окружающей среды // Тез. докл. II Всесоюз. съезда океанологов. Севастополь: АН СССР - АН УССР, 1982. С. 52-54.
18. Bocharov L.N. The discription of the biological systeme state at their modelling // IFIP TC-7. Working conference on Mathematical in

- Immunology and Medicine. Moscow, 1982. P. 93-96.
19. Бочаров Л.Н. Анализ статистической модели распознавания перспективных районов промысла // Проблемы краткосрочного промыслового прогнозирования и управления: Тез.докл. I Всесоюзн. совещ. Владивосток, 1982. С. 73- 76.
20. Бочаров Л.Н. Математические методы в краткосрочном рыбопромысловом прогнозировании // Проблемы краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования и управления. Тез.докл. I Всесоюз. совещ. Владивосток, 1982. С. 15 -19.
21. Бочаров Л.Н. Анализ информативности системы описания термики деятельного слоя океана для определения районов концентрации дальневосточной сардины *Sardinops sagax Melanosticta* // Вопросы ихтиологии, 1983. Т. 23, вып. 5. С. 707-717.
22. Бочаров Л.Н., Чемерис М.Б. Оценка качества краткосрочных промысловых пргнозов // Рыб. хоз-во, 1983. N 9. С. 25-26.
23. Бочаров Л.Н. Опыт краткосрочного прогнозирования перспективных районов промысла с помощью ЭВМ (на примере япономорской сардины) // Изв. ТИНРО. 1984. Т. 109. С. 17-29.
24. Бочаров Л.Н. Системные принципы в моделировании и прогнозировании скоплений промысловых рыб // Теория, методология и практика системных исследований: Тез. докл. Всесоюз. конф. М.: ГКНТ - АН СССР, 1984. С. 8-11.
25. Бочаров Л.Н., Каредин Е.П. Задачи прогнозирования промысловой обстановки // Проблемы дальневосточной рыбохозяйственной науки. М.: Агропромиздат, 1985. С. 83-94.
26. Бочаров Л.Н., Абакумов А.И. Математические методы в рыбохозяйственных исследованиях // Математические методы исследования операций в рыбном хозяйстве. Владивосток: ТИНРО, 1985. С. 3-22.
27. Абакумов А.И., Бочаров Л.Н., Решетняк Т.М. Оптимизация числа добывающих судов в рыбопромысловой экспедиции с раздельным циклом добычи и обработки // Математические методы исследования операций в рыбном хозяйстве. Владивосток: ТИНРО, 1985. С. 88-95.
28. Абрамов В.Л., Бочаров Л.Н. СОРПУ - система оперативного рыбопромыслового прогнозирования и управления // Математические методы исследования операций в рыбном хозяйстве. Владивосток: ТИНРО, 1985. С. 63-74.
29. Бочаров Л.Н. Исследование регрессионной модели оценки промысловой обстановки // Проблемы краткосрочного промыслового прогнози-

- рования и управления: Тез. докл. II Всесоюзн. совещ. Калининград: АтлантНИРО, 1985. С. 12-14.
30. Бочаров Л.Н., Абрамов В.Л., Кузьмин Ф.Ф., Фролова Н.В. Рекомендации по применению диалоговой системы оперативного рыбопромышленного прогнозирования и управления (СОРПУ) Владивосток: ТИНРО, 1986. С. 96.
31. Бочаров Л.Н. Краткосрочное рыбопромышленное прогнозирование на дальневосточном бассейне // Рыб.хоз-во, 1986. N 12. С. 18-22.
32. Бочаров Л.Н., Н.В.Булатов, Н.Г.Приходько, Харченко А.М. Состояние и перспективы использования космической информации в океанологических исследованиях дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана и ее практического применения // Тез. докл. III Всесоюз. съезда океанологов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 50-52.
33. Алексеев И.Ф., Бочаров Л.Н., Цой В. Применение вертолетных комплексов для исследования гидрологических полей морей и океанов // Тез. докл. Всесоюз. школы "Технические средства и методы исследования Мирового океана". М.: ИО АН СССР, 1987. Т. 1. С.4.
34. Bocharov L.N. Modern trends in prediction of fishing condition with special reference to the Far East seas // International Symposium on Operational Fishery Oceanography. Abstracts. St. John's, 1989. P. 56-57.
35. Бочаров Л.Н. Состояние проблемы рыбопромышленного прогнозирования на дальневосточном бассейне с точки зрения системы // Биол. моря. 1989. N 1. С. 3-11.
36. Бочаров Л.Н. Судовой информационно-прогностический центр на промысле сардины и сайры СЗТО // Результаты исследований по прогнозированию промысловой обстановки на Дальнем Востоке. Владивосток: ТИНРО, 1989. С. 87-96.
37. Bocharov L.N., Abramov V.L., Kuzmin F.F.; System of processing and analysis of the results of contact and remote sounding of an ocean in fishes // I-st Soviet-Chinese Symposium on Oceanography. Abstracts. Vladivostok, 1990. P. 92-93.
38. Бочаров Л.Н. Современные тенденции информационного обеспечения фоновых исследований для целей рыбопромышленного прогнозирования на примере дальневосточного бассейна // Дистанционные исследования океана. Владивосток: ТИНРО, 1990. С. 3-9.
39. Алексеев И.Ф., Бочаров Л.Н., Москальцов Ю.И., Орел Е.Г., Складов Ю.М., Харченко А.М.. Комплексный промыслово-океанологический эксперимент "Вертикаль-ССС" с использованием

- судов, самолетов, спутников // Дистанционные методы исследования океана. Владивосток: ТИНРО, 1990. С. 151-159.
40. Бочаров Л.Н., Абрамов В.Л., Кузьмин Ф.Ф., Фролова Н.В. Программное обеспечение системы оперативного рыбопромышленного прогнозирования и управления для персонального компьютера // Владивосток: ТИНРО, 1990. С. 69.
41. Бочаров Л.Н. Системный анализ в краткосрочном рыбопромышленном прогнозировании // Л.: Наука, 1990. С. 208.