



УДК 519.8

© 2017 г. А.И. Абакумов, д-р физ.-мат. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

КАКИМ ДОЛЖЕН БЫТЬ РЕЖИМ РЫБНОГО ПРОМЫСЛА?

Рыбный промысел в море осуществляется в условиях значительных и часто быстрых изменений численности промыслового стада рыб. Показано, что популяционная динамика нивелируется структурой популяции и сглаживается при промысле, особенно оптимальном. Оптимальный промысел можно выбирать из простого класса постоянных по интенсивности управлений. Такой промысел по эффективности мало отличается от оптимального в широком классе кусочно-непрерывных по интенсивности управлений.

Ключевые слова: оптимизация, дифференциальные уравнения, популяция рыб, динамика численности, промысел, математическое моделирование.

DOI: 10.22250/isu.2017.54.12-19

Введение

Рыболовство занимает большое место в человеческой деятельности. Морское и океаническое рыболовство связано со многими проблемами, в том числе и информационного характера [1, 2]. Знания о биологических ресурсах, их состоянии и функционировании неполны. Для рыбных популяций трудноопределяемыми характеристиками являются их пространственно-временная динамика, естественная смертность и формирование пополнения [3]. Научные экспедиции, промысловая статистика и иные источники информации лишь частично восполняют эти пробелы. Соответствующую область исследований известный специалист в области анализа водных биоресурсов и управления рыбным промыслом С.W. Clark назвал «Bioeconomics» в своей книге [4] и ее более ранних изданиях.

Другой проблемой рыболовства является сам процесс промысла. С экологической точки зрения важны проблемы технологий промысла (потери неиспользуемой части вылова) и экологические последствия изъятия биоресурса. В теории рыболовства [3, 4] разработаны различные варианты стратегий промысла. В большинстве случаев они описывают какое-либо закономерное состояние популяции или сообщества, – например, равновесное или как-либо соответствующее

известным характеристикам рыб. Если же рассматривать динамический режим, то система может находиться в состоянии, далеком от равновесного, что существенно влияет на динамику популяции, результаты промысла и последствия промышленного воздействия [5].

Известно, что для однородной популяции (все особи одинаковы по своим свойствам) математические модели указывают на стабилизацию общей численности при оптимальном промысле [6]. Оптимальный режим «ловит» популяцию в точке максимального роста и удерживает в стационарном состоянии почти весь рассматриваемый период. Сложнее дело обстоит в моделях структурированных популяций. В некотором смысле стабилизация каких-то параметров популяции происходит [7], но далеко не всегда [8].

В работе рассматривается рыбный промысел для популяции с размерной структурой. Речь идет о линейном размере особи – характерной длине. Для рыб это измеряемая характеристика, она существенна для особей и является своеобразным индикатором их состояния и особенностей функционирования.

Популяция и промысел

Состояние популяции описывается функцией $y(t, x)$ плотности обилия (численности или биомассы) по переменной x размера особи и по времени t , $t \in T = [0, T]$ (время измеряется в годах, на рисунках указывается в долях от T). В наших расчетах T составляет несколько десятков лет. Это примерно удвоенный предельный возраст жизни рыб моделируемой популяции. Переменная x означает характерную длину особи. Длина для удобства принята нормированной величиной $x \in D = [0, 1]$. Динамика плотности обилия популяции описывается параболическим уравнением [10]

$$\partial_t y + \nabla \cdot (vy) = \Delta(y) + F(t, x, u, y). \quad (1)$$

Вектор $v = v(t, x)$ означает скорость роста рыб. Символом « \cdot » обозначено скалярное произведение. Символ ∇ , как обычно, обозначает оператор взятия производной по переменной x (градиент), а оператор Δ описывает диффузионные процессы и имеет вид $\Delta(y) = \nabla \cdot (k \nabla y)$, где k – коэффициент диффузии. Система управляется воздействиями, описываемыми скалярной кусочно-непрерывной функцией $u = u(t, x)$ из некоторого множества функций U . Эта функция имеет смысл *интенсивности* (количество промысловых усилий в единицу времени) рыбного промысла. Полезность управления определяется функцией дохода $\varphi(t, x, y, u)$, в качестве критерия оптимизации выставляется максимизация дохода за период промысла T :

$$\int_{T \times D} \varphi(t, x, y, u) dt dx \rightarrow \max_{u \in U}. \quad (2)$$

Задача (1), (2) с соответствующими начальными и граничными условиями решается введением функции Лагранжа и построением двойственной системы дифференциальных уравнений (системы оптимальности) [11, 12].

Для популяции в качестве начального состояния выбираем равновесное состояние в модели (1) при отсутствии промысла. Вид функций естественной смертности, улавливаемости и скорости роста выбирается на основе традиционных представлений [9, 13].

Среда обитания моделируется с медленными изменениями (эпохально) периодической по времени функцией и ежегодными случайными вариациями обилия появляющегося в очередном году поколения. Так определяются граничные условия для уравнения (1).

Традиционная связь «запас – пополнение» может описываться интегральным уравнением, показывающим связь половозрелых особей с их потомством. В ином варианте эта связь вообще не используется, так как пополнение у рыб формируется под действием следующих обстоятельств: самки имеют чрезвычайно высокую плодовитость, а икра и личинки подвержены столь же большой смертности. Смертность особей на ранних стадиях онтогенеза определяется природными условиями среды в местах нереста и чрезвычайно вариабельна. Это означает, что продуктивность нереста зачастую зависит не от численности родителей, а от случайно складывающихся условий среды обитания в местах нереста. Такая ситуация справедлива для многих видов рыб. Это, например, многие пелагические и мезопелагические промысловые рыбы в дальневосточных морях Тихого океана, справедливо это и для других районов рыболовства. Среди массовых рыб можно назвать минтай, сельдь, треску, навагу и многие другие виды [14].

Расчеты и результаты

Рыбная популяция под воздействием промысла может сильно менять свою промысловую численность. Популяция омолаживается – средний возраст особей становится меньше. Но, если не подорван репродуктивный потенциал, популяция стабилизирует себя при резких воздействиях среды или человека. Происходит сглаживание воздействий среды обитания, популяция своей структурой обеспечивает стабилизацию. Промысел в оптимальном режиме еще более способствует такому сглаживанию: популяция адекватно реагирует на промысловое давление, сглаживая его динамикой своей структуры.

Нелинейность функции дохода (2) от интенсивности промысла кардинально меняет свойства функции управления – интенсивности промысла. Эта функция становится непрерывной и реализуемой в реальной промысловой ситуации, разрывное управление для линейной функции дохода [6] реализовать сложнее.

На рис. 1 – 3 представлены результаты расчетов, когда среда обитания подвержена двум эпохальным колебаниям: функция интенсивности промысла зависит от времени и размеров особей $u = u(t,x)$, обилие популяции измеряется ее биомассой. В этом случае плотность биомассы популяции при отсутствии промысла имеет вид, приведенный на рис. 1.

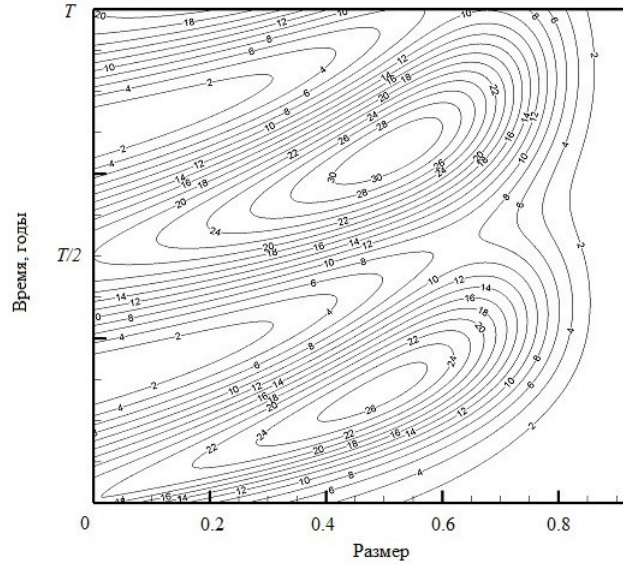


Рис. 1. Плотность численности при отсутствии промысла.

При оптимальном сборе урожая получается существенное уменьшение плотности биомассы, но качественная картина остается похожей (рис. 2).

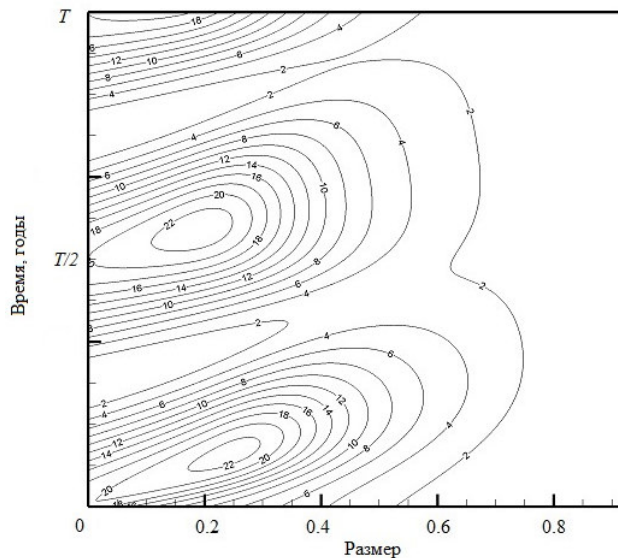


Рис. 2. Плотность численности при оптимальном промысле.

При этом функция управления – интенсивность промысла – своими наибольшими значениями в целом согласуется с максимумами биомассы промысловой части популяции (рис. 3). Детали зависят от функции дохода, в том числе определяются параметрами разрешений на промысел особей определенных размерных характеристик.

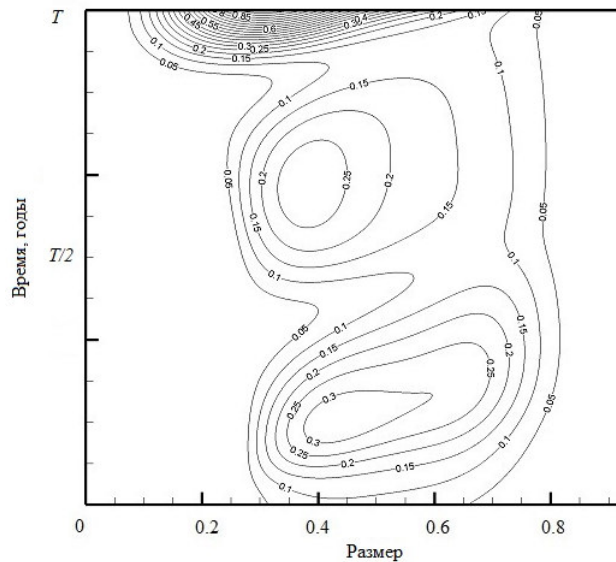


Рис. 3. Интенсивность u оптимального промысла.

Следующий вариант расчетов (рис. 4 – 6) описывает ежегодные стохастические воздействия среды на популяцию [9, 15]. Эти воздействия сказываются на величинах пополнения (мы его оцениваем по численности мальков возраста 0+). Обилие популяции измеряется ее численностью. Здесь мы также учитываем, что управление интенсивностью промысла (в зависимости от размеров особей) во времени доступно, но трудно осуществимо. По размерам интенсивность определяется фиксированной функцией улавливаемости. Функция улавливаемости отражает свойства орудий лова, оперативное изменение которых весьма затруднительно, а зачастую и невозможно. В этом варианте расчетов функция интенсивности промысла зависит только от времени $u = u(t)$.

В соответствии с предположением о зависимости численности пополнения от вариаций условий среды обитания имитируем численность пополнения с использованием датчика случайных чисел (рис. 4). Плотность численности популяции без промысла и с промыслом в своем изменении «следует» за колебаниями численности пополнения с гораздо меньшими градиентами, чем у пополнения. При оптимальном режиме промысла по критерию (2) плотность численности снижается в несколько раз, но качественная структура остается похожей на нее и без промысла.

Интенсивность оптимального промысла следует за изменениями плотности численности, но колебания значительно менее интенсивны, чем у пополнения (рис. 5 в сравнении с рис. 4). Это связано с тем, что промысел в каждом году осуществляется в контакте с несколькими поколениями рыб, воздействие урожайных и неурожайных поколений несколько усредняется. Кроме того, стохастические изменения численности пополнения несколько сглаживаются ко времени вступления в промысловый возраст.

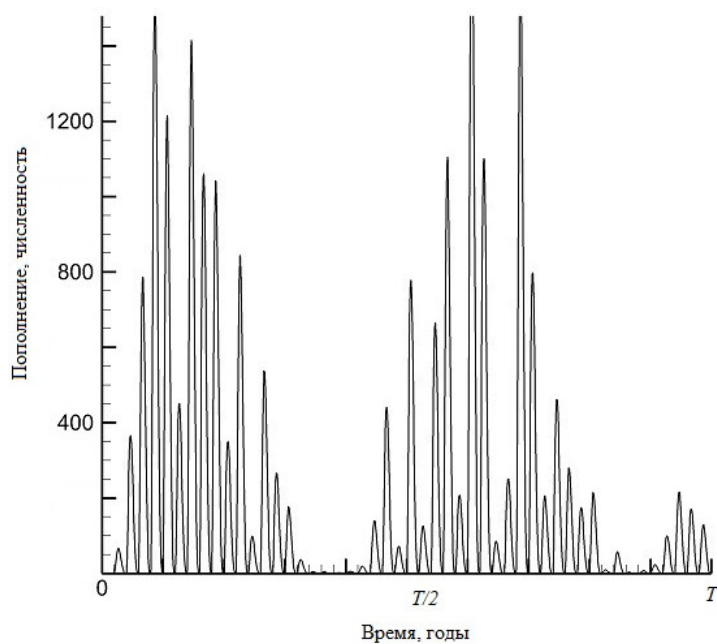


Рис. 4. Численность пополнения.

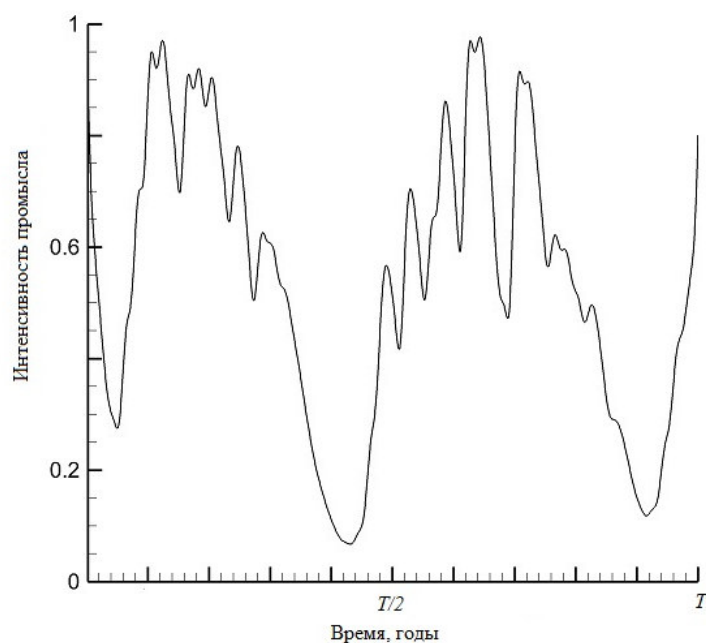


Рис. 5. Интенсивность промысла.

Неожиданным оказался тот факт, что оптимальный с постоянной интенсивностью промысел по результатам (по суммарной годовой численности выловленных рыб) незначительно отличается от оптимального с переменной интенсивностью (рис. 6). Заметное различие возникает лишь в экстремальных точках и в целом составляет не более 10%.

Поскольку многие популяции распространенных видов промысловых рыб укладываются в нашу схему построения модельной популяции, то указанный результат может оказаться весомым: оптимальный вариант промысла можно искать среди постоянных по интенсивности, а этот класс управлений весьма узкий и легко поддающийся анализу.

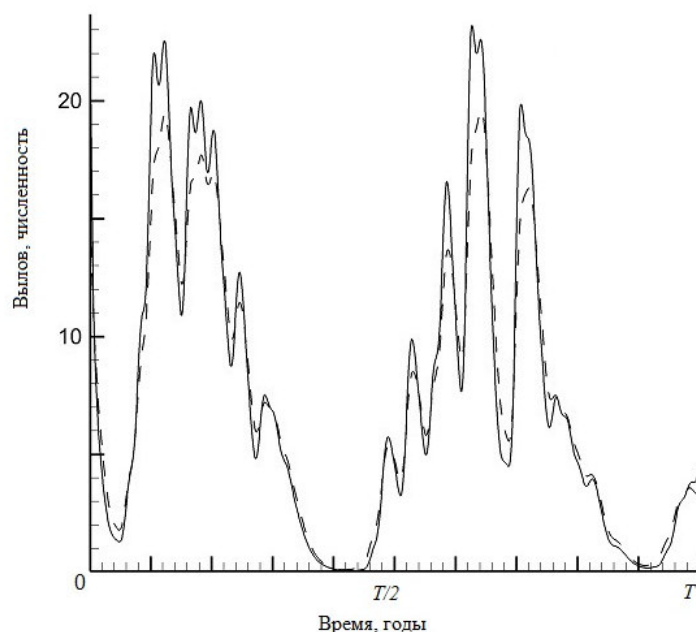


Рис. 6. Результаты промысла при оптимальном (---) и оптимальном среди промыслов с постоянной интенсивностью (-.-.).

В целом надо признать, что оптимальный постоянный по интенсивности промысел почти так же эффективен, как и оптимальный переменный по интенсивности промысел. Это согласуется с известной практикой медленного изменения количества промысловых усилий на рыбном промысле от года к году.

Заключение

При управлении промыслом модельные расчеты позволяют численно оценить рациональные действия по оптимизации промысла и минимизации негативных последствий в динамичных условиях внешней среды. Это можно проследить на примерах рыбного промысла в различных районах Мирового океана [4, 14].

Рыбная популяция в стохастически меняющихся условиях внешней среды под воздействием промысла может сильно менять свою промысловую численность. Популяция омолаживается – средний возраст особей становится меньше. Но, если не подорван репродуктивный потенциал популяции, она стабилизирует себя при резких воздействиях среды или человека. Популяция сглаживает резкие воздействия среды, своей структурой обеспечивает стабилизацию. Промысел в оптимальном режиме еще более способствует такому сглаживанию. Популяция адекватно реагирует на промысловое давление, сглаживая его динамикой своей структуры. Особи в популяции могут обладать разными стратегиями поведения, но и сама по себе популяционная структура является стабилизирующим фактором при внешних воздействиях.

В наших расчетах оптимальный постоянный по интенсивности промысел близок по эффективности и результатам к оптимальному переменному по интен-

сивности промыслу. Это результат компьютерных экспериментов, позволяющий надеяться на наличие такого рода стационарности в распределенных моделях популяционной динамики. Можно увидеть аналогию с теоремами о магистралях в «точечных» моделях для популяций [6]. Этот факт оправдывает применение постоянного по интенсивности рыбного промысла. Возможно, промысел не требует ежегодного детального управления, но важно определить оптимальную постоянную интенсивность промысла, адекватную свойствам природной популяции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Winemiller K.O.* Life history strategies, population regulation, and implications for fisheries management // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2005. – Vol. 62, № 4. – P.872-885. DOI: 10.1139/f05-040.
2. *Neubert M.G.* Marine reserves and optimal harvesting // *Ecology Letters*. – 2003. – Vol. 6. – P.843-849. DOI: 10.1046/j.1461-0248.2003.00493.x.
3. *Ricker W.E.* Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada. – 1975. – № 191.
4. *Clark C.W.* Mathematical Bioeconomics. The Mathematics of Conservation. Third Edition. – New Jersey: J.Wiley and Sons Publ., 2010.
5. *Hilborn R., Fulton E.A., Green B.S., Hartmann K., Tracey S.R., Watson R.A.* When is a fishery sustainable? // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2015. – Vol. 72, № 9. – P.1433-1441. DOI: 10.1139/cjfas-2015-0062.
6. *Абакумов А.И.* Управление и оптимизация в моделях эксплуатируемых популяций. – Владивосток: Дальнаука, 1993.
7. *Абакумов А.И., Худзик Т.А.* Асимптотика в матричных моделях динамических систем // *Дальневосточный математический журнал*. – 2003. – Т. 4, №1. – С.44-51.
8. *Фрисман Е.Я., Жданова О.Л., Колбина Е.А.* Влияние промысла на генетическое разнообразие и характер динамического поведения менделеевской лимитированной популяции // *Генетика*. – 2010. – Т. 46, № 2. – С.240-251.
9. *Абакумов А.И., Израильский Ю.Г.* Эффекты промыслового воздействия на рыбную популяцию // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2016. – Т. 11, № 2. – С.191-204.
10. *Cantrell R.S., Cosner C.* Spatial ecology via reaction-diffusion equations. – New York: J. Wiley and Sons Ltd, 2003.
11. *Иоффе А.Д., Тихомиров В.М.* Теория экстремальных задач. – М.: Наука, 1974.
12. *Абакумов А.И.* Оптимальное управление популяцией с распределенными параметрами. // *Информатика и системы управления*. – 2011. – № 29. – С.3-9.
13. *Менишуткин В.В.* Имитационное моделирование водных экологических систем. – СПб.: Наука, 1993.
14. *Моисеев П.А.* Биологические ресурсы Мирового океана. – М.: Агропромиздат, 1989.
15. *Абакумов А.И., Израильский Ю.Г.* Стабилизирующая роль структуры рыбной популяции в условиях промысла при случайных воздействиях среды обитания // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2017. – Т. 9, № 4.

E-mail:

Абакумов Александр Иванович – abakimov@iacp.dvo.ru.