

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МОДЕЛИ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОПУЛЯЦИИ АТЛАНТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ

Васильева Н. А.¹, Владимиров А. А.^{1,3*}, Винтер А. М.²

¹*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Междисциплинарная лаборатория математического моделирования почвенных систем, Москва, Россия*
nadezda.vasilyeva@gmail.com

²*Университет Осло, Центр экологического и эволюционного синтеза, Осло, Норвегия*
a.m.winter@ibv.uio.no

³*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*
artem.a.vladimirov@gmail.com

Аннотация: предложено развитие модели возрастной структуры атлантической трески с учетом нелинейных эффектов замедления воспроизводства при низкой плотности популяции (эффект Олли) и увеличения смертности при большой плотности (конкуренция за ресурсы). Модель параметризована на исторических данных и используется для оценки рисков критического падения популяции при промышленном рыболовстве.

1. Введение

Модели возрастной структуры популяции широко используются для оценки запасов и определения квот на вылов различных промысловых рыб, в частности, атлантической трески (*Gadus morhua*), некоторые популяции которой претерпевали резкие падения биомассы (коллапс у берегов Канады 92 года) (Shelton et al, 2006). Даже полный запрет на вылов рыбы не всегда приводит к восстановлению ее биомассы. Интерес представляет разработка механистической модели популяции атлантической трески по данным многочисленных официальных экспериментальных оценок ее параметров, учитывающая возможные нелинейные эффекты ее поведения для дальнейшего изучения и возможности разработки методологии раннего обнаружения признаков изменения режима функционирования рыбной популяции и своевременного изменения промышленной нагрузки.

2. Формулировка модели

Состояние популяции в модели в данном году y описывается количеством особей $N(y, a)$ всех возрастов $a \in [1, A]$, где A – максимальный возраст рыбы в модели. Масса рыбы, способной давать потомство, дается уравнением: $SSB(y) = \sum_{a=2}^A N(y, a)P(a)W(y, a)$, где $P(a)$ – доля особей, дающих потомство и $W(y, a)$ – масса одной особи. Количество потомства в данном году является функцией от SSB прошлого года $N(y, 1) = R(SSB(y-1))$. В данной работе мы предлагаем использовать функцию вида аналитического решения логистического дифференциального уравнения

$$R(SSB) = \frac{L}{1 + e^{-k(SSB - SSB_0)}} \quad (1)$$

характерного для динамики выживания мальков в среде с ограниченной емкостью L , где k и SSB_0 – параметры степени Олли-эффекта (при малых плотностях популяции), которая в отличие от традиционно применяемых, является механистической, лучше описывает экспериментальные данные $R(SSB)$ и позволяет получить два устойчивых состояния, обсуждавшихся ранее в (Liermann, Hilborn, 2001). Количество особей, выживших в данном году для всех возрастов дается уравнением:

$$\forall a \in [2, A] \quad N(y, a) = N(y-1, a-1)e^{-F(y-1, a-1) - M'(y-1, a-1)},$$

в котором мы модифицируем естественную смертность, добавляя зависимость от плотности популяции

$$M'(y, a) = M(a) + \ln(1 - TB(y)/TB_{\max})^{-1} - \ln 1.1, \quad (2)$$

где $TB_{\max}$ – емкость экологической ниши, $TB(y) = \sum_a^A N(y, a)W(y, a)$ – общая биомасса рыбы,

$M(a)$ – средняя смертность особей возраста a за период наблюдений, $F(y, a)$ – вероятность вылова. Неизвестные параметры модели $TB_{\max}$, L , k и SSB_0 , определяются из условия минимального отклонения вычисленного $SSB(y)$ от исторических данных

$q = \sum_{y=1}^{\max_y} |\log(SSB_{fit}(y)) - \log(SSB_{data}(y))|$ (рисунок 1а). Значения $F(y, a)$ и $W(y, a)$ в исторический

период известны и используются для параметризации модели. При построении прогноза $F(y, a)$ определяется выбранной стратегией вылова, а $W(y, a)$ – алгоритмом случайного блуждания с параметрами полученными из исторических данных.

3. Результаты и обсуждение

Олли-эффект в новой функции пополнения (уравнение 1) и нелинейная смертность (уравнение 2) позволяют хорошо описать исторические данные и моделировать возможные коллапсы и восстановления (рисунке 1а). На рисунке 1б приведена фазовая диаграмма демографического роста популяции полученная из временной серии симуляции модели с коррелированным случайным блужданием вылова, на которой цветом показаны характерные участки: коллапс (красный), восстановление (зеленый), устойчивое состояние при малой плотности популяции (малиновый), снижение популяции без коллапса (желтый), рост после снижения (синий).

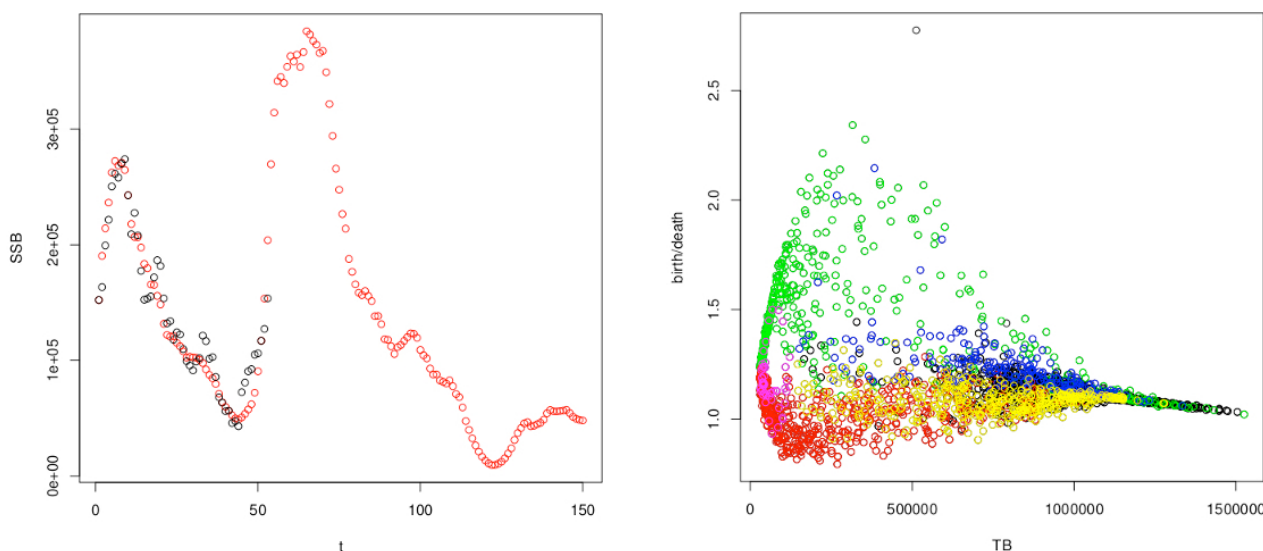


Рисунок 1 – а) (слева) Динамика нерестящейся биомассы (SSB), исторические данные (черный), модель (красный); б) (справа) динамическая демографическая фазовая диаграмма рождение/смертность популяции от общей биомассы рыб (TB)

Работа выполнена при поддержке фонда NordForsk в рамках проекта нордик-российского сотрудничества TerMARisk № 81513.

Литература

Shelton P.A., Sinclair A.F., Chouinard G.A., Mohn R. and Duplisea D.E. Fishing under low productivity conditions is further delaying recovery of Northwest Atlantic cod (*Gadus morhua*) // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 2006. Vol. 63, Issue 2, pp. 235-238.

Liermann M., Hilborn. Depensation: evidence, models and implications // FISH and FISHERIES, John Wiley & Sons, Inc. 2001. Vol. 2. Issue 1, pp. 33-58.