

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ШПРОТА НА СЗШ ЧЁРНОГО МОРЯ

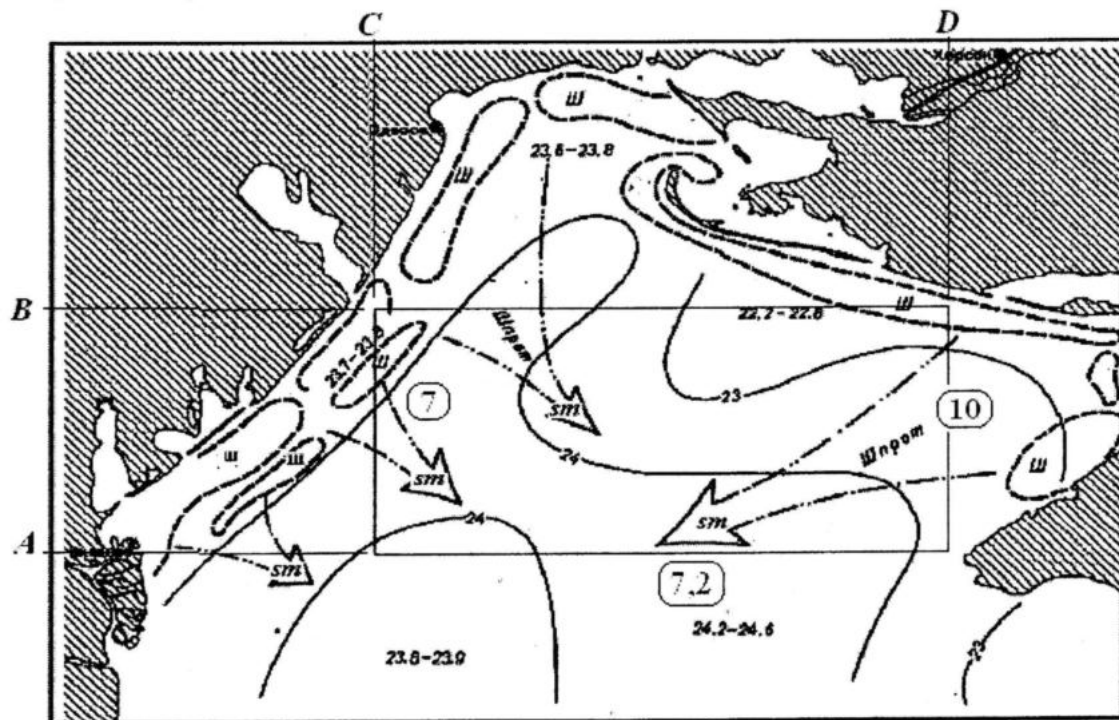
В.С. Латун

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: lee@alpha.mhi.iuf.net

Учёт летней миграции шпрота в математической модели экосистемы СЗШ Чёрного моря приблизил возможность использовать разрабатываемую модель для управления промыслом шпрота.

Формализация промысла шпрота, предложенная в работе [1], была использована при разработке базового варианта эколого-экономической модели системы «Биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота на СЗШ» [2].

В этой модели были впервые учтены промысел шпрота, процессы его жизнедеятельности (в том числе температурный и кормовой таксис), а также влияние изменчивости концентрации биогенов на продуктивность фитопланктона. Ради возможности сравнительного анализа последовательно усложняемых моделей, на границах акватории для рыб всех трёх видов были заданы одинаковые условия: после прихода на СЗШ весной до ухода с него осенью рыбы оставались в пределах модельной акватории. Чтобы получить адекватные рекомендации по управлению промыслом шпрота, на новом этапе моделирования, необходимо учесть его летнюю миграцию – переход шпрота из прогретых до дна прибрежных вод на основную акваторию промысла (рис 1). Цель предлагаемой работы – формализовать и учесть в модифицированной модели летнюю миграцию шпрота.



Р и с.1. Места скопления шпрота весной (*ш*) и пути его миграции в третьей декаде июля (*sm*). Температура воды на поверхности (изолинии, интервалы значений) и в придонном слое (крупные цифры в рамке). Прямоугольник – граница модельной акватории (*A* –  $45^{\circ} 25' \text{ с. ш.}$ , *B* –  $46^{\circ} 00' \text{ с. ш.}$ , *C* –  $30^{\circ} 30' \text{ в. д.}$ , *D* –  $32^{\circ} 25' \text{ в. д.}$ )

**Содержание модели.** Модельная акватория перспективна для увеличения добычи шпрота по следующим причинам: 1. Значительная часть шпрота,

пришедшего весной на СЗШ, остаётся в богатых зоопланктоном прибрежных водах с глубинами 20 – 25 м до третьей декады июля. 2. Когда прогрев прибреж-

ных вод достигает дна и холодолюбивый шпрот теряет возможность проводить светлое время суток ниже скачка температуры, для питания поднимаясь ночью в вышележащие воды, он мигрирует в более глубокие воды, на модельную акваторию. В результате концентрация шпрота здесь значительно увеличивается. 3. На большей части акватории дно ровное, глубина моря изменяется в пределах 30 – 45 м и придонный слой вод с температурой  $\leq 8^{\circ}\text{C}$  сохраняется до конца тёплого сезона. Но прогрев вод, примыкающих к прибрежному мелководью, продолжается, скачок температуры достигает дна и шпрот в пределах модельной акватории переходит на большие глубины. Концентрация шпрота продолжает локально увеличиваться.

Миграции шпрота в южном направлении препятствуют определённые экологические условия: В 30 милях южнее модельной акватории расположен материковый склон, вдоль которого на ЮЗ перемещаются глубокие антициклонические круговороты диаметром 30 – 40 миль. Круговое течение над материковым склоном проникает до дна. В придонном слое происходит вынос глубинных вод на материковую отмель, в результате вблизи южных границ модельной акватории у дна периодически уменьшается содержание кислорода или появляются следы сероводорода [3, 4]. 2. Южнее модельной акватории концентрация кормового зоопланктона резко уменьшается. Основу рациона шпрота составляют копеподы. В прибрежных районах СЗШ пищевая конкуренция между шпротом и хамсой обостряется в период май – середина июля, до миграции шпрота на более глубокие акватории. Шпрот и хамса входят в рацион взрослой ставриды, но гидрологическим летом холодолюбивый шпрот малодоступен для теплолюбивой ставриды.

Для учёта летней миграции шпрота из прибрежных вод на модельную акваторию необходимо формализовать этот процесс. Летняя миграция является разновидностью температурного таксиса. И на модельной акватории, и на её прибрежных границах, стимулом к движению шпрота служит градиент температуры придонных вод. В обоих случаях

температурный таксис императивен по отношению к таксису кормовому: шпрот сначала переходит в температурно-комфортные для него придонные воды, после чего возобновляется кормовой таксис. На модельной акватории изменения температурной стратификации и горизонтального градиента придонной температуры происходят медленно, соответственно скорость температурного таксиса была формализована в рамках представлений о медленном таксисе [5]. Во второй половине июля на мористой границе прибрежного мелководья температура воды у дна повышается гораздо быстрее, чем в прилегающих, более глубоких, водах модельной акватории. Шпрот вынужден за короткое время покинуть прибрежные воды. Мелкомасштабные пульсации скорости при летней миграции шпрота незначительны, поэтому от горизонтального градиента придонной температуры на границе модельной акватории зависит не ускорение, а скорость движения шпрота (“быстрый таксис”) [6]. Для учёта летней миграции шпрота, в модели [2], необходимо соответственно изменить граничные условия.

**Формализация новых граничных условий.** На модельной акватории зональная изменчивость экологических характеристик значительно превышает их меридиональную изменчивость и основные особенности изучаемых процессов можно имитировать в рамках одномерной по пространству динамической задачи. В натуральных данных обнаружено подобие меридиональной изменчивости компонентов модели, что на следующем этапе исследования может облегчить решение автомодельной, двумерной по пространству задачи [7]. Учитывая такую перспективу, на каждом этапе развития модели новые дифференциальные уравнения получены в пространственно двумерном виде (горизонтальные координаты). Для имитации экологических процессов на модельной акватории используются пространственно одномерные варианты этих динамических уравнений. В пространственно двумерном виде (горизонтальные координаты), получено следующее уравнение:

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = \bar{U}_T \bar{\nabla} F_2 = -b_v \bar{\nabla} T_b \bar{\nabla} F_2 * H(T_b - T_{st}) H(T_f - T_b) \quad (1)$$

где  $F_2(x, y, t)$  – удельная биомасса шпрота,  $U_T(x, y, t)$  – скорость быстрого температурного таксиса,  $T_b(x, y, t)$  – температура придонных вод,  $T_{st}(x, y, t_1)$ ,  $T_f(x, y, t_2)$  –  $T_b(x, y, t)$  в начале и в конце миграции шпрота соответственно,  $H(\dots)$  – единичная функция Хевисайда,  $b_v$  – коэффициент.

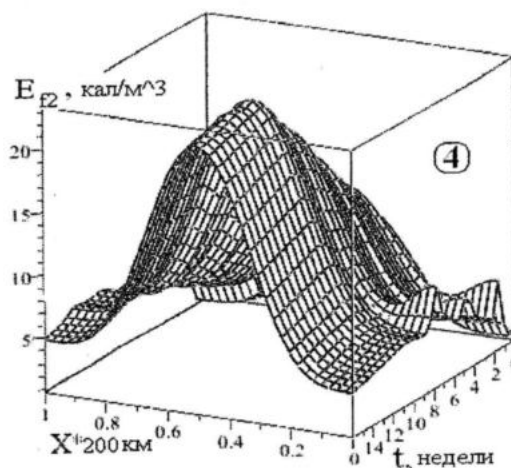
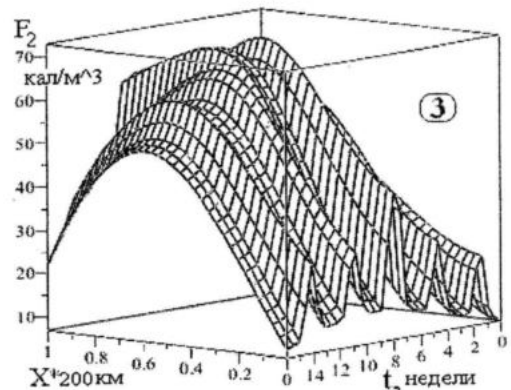
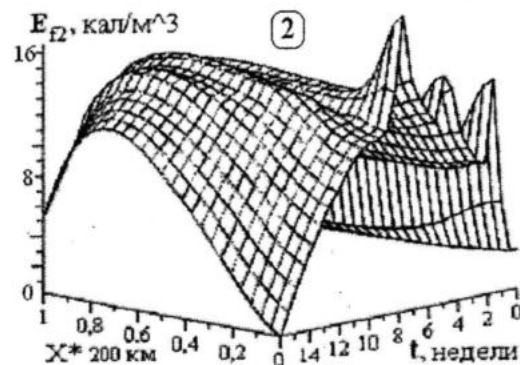
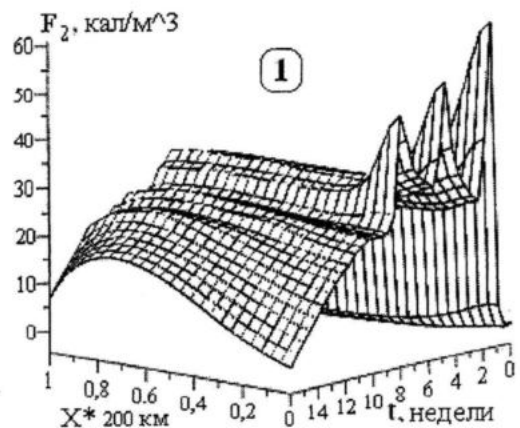
Для одномерной по пространству динамической модели из (1) для модельной акватории следует формула:

$$\bar{F}_{2(w,e)} = -b_v \int_{t_1(w,e)}^{t_2(w,e)} \frac{\partial T_{b(w,e)}}{\partial x} \frac{\partial F_{2(w,e)}}{\partial x} * H(T_{b(w,e)} - T_{st}) H(T_f - T_{b(w,e)}) dt \quad (2)$$

где  $\bar{F}_{2(w,e)}$  – биомасса шпрота, перешедшего с прибрежной отмели на модельную акваторию через западную ( $w$ ) или восточную ( $e$ ) её границу.

Первым результатом работы стали количественные оценки влияния летней миграции шпрота на его концентрацию и вылов в пределах модельной акватории (рис. 2). Максимальное увеличение удельной биомассы и вылова шпрота получены в центральной части модельной акватории после быстрого прихода сюда шпрота из прогретых прибрежных вод и медленного температурного таксиса в пределах акватории. Соответственно интенсифицировалась работа рыбопромыслового флота.

**Базовый вариант новой модели.** При адаптации зависимостей (1, 2) к экологическим условиям СЗШ использованы имеющиеся архивные сведения об изменчивости температуры придонных вод [8], о максимальной скорости плавания мелких промысловых рыб и о приросте биомассы шпрота, весной пришедшего на откорм [9]. С учётом более сложных граничных условий для шпрота, получено устойчивое численное решение нового варианта задачи, поставленной в работе [2]. Модель адаптирована к экологическим условиям СЗШ и позволяет проводить содержательные вычислительные эксперименты.



Р и с. 2. Изменчивость биомассы ( $F_2$ ) и вылова ( $E_{F_2}$ ) шпрота на модельной акватории без учёта (1, 2) и с учётом (3, 4) его летней миграции .

Через западную границу модельной акватории летняя миграция шпрота заканчивается на две недели раньше, чем через восточную. Далее прогрев придонных вод происходит медленнее, температурный таксис тоже направлен к центру акватории. В результате во второй половине гидрологического лета в центральной части акватории концентрируется вдвое больше шпрота, чем было до учёта его летней миграции. При сохранении прежней промысловой базы, возросла производительность рыбопромыслового флота. Добыча шпрота увеличилась, за промысловый сезон выловом изъято около 15% его суммарной биомассы, что вдвое меньше максимально допустимого вылова.

Для анализа динамики функциональных зависимостей между компонентами биоценоза, предстоит выполнить большую серию вычислительных экспериментов. Особый интерес представляет анализ поведения системы при экстремальных природных воздействиях на неё и возможных переломах шпрота. При переломах рыб нарушается естественная возрастная структура популяции, что уменьшает её продукционный потенциал. Для учёта этого фактора в математической модели, необходимо знать исходную структуру популяции, объёмы вылова и размерно-возрастную избирательность конкретной технологии промысла. Современный метод промысла весьма эффективен – это прицельное траление в придонном слое с использованием специального эхолотатора.

**Заключение.** Учёт летней миграции шпрота в эколого-экономической модели системы «Биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота на СЗШ» показал возможность значительно увеличить вылов шпрота. При усвоении в модели данных оперативных измерений температурной стратификации вод, реальной становится задача управления промыслом шпрота. Для обоснования пределов его промыслового изъятия, необходимо учитывать межгодовые тренды экологических характеристик и накопленные данные о влиянии механизированного рыбного промысла на устойчивость экосистемы Чёрного моря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Латун В. С.* Черноморский шпрот в море и в эколого-экономических моделях. Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 2010. – Выпуск 13. – С. 141 – 145.
2. *Латун В.С.* Эколого-экономическая модель системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота». Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 2011. – Выпуск 16. – С. 145 – 154.
3. *Латун В.С.* Влияние антициклонических вихрей на водообмен между северо-западным мелководьем и глубоководной частью Чёрного моря. Комплексные исследования Чёрного моря: Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 1995. – С. 37 – 47.
4. *Безбородов А.А.* Гидрохимия зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод в Чёрном море. Процессы формирования и внутrigодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Чёрного моря / Сб. науч. тр. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т, 1988. – С. 121 – 147.
5. *Говорухин В.Н., Моргулис А.Б., Тютюнов Ю.В.* Медленный таксис в модели хищник – жертва. // Доклады РАН. – 2000, т. 372, № 6. – С. 730 – 732.
6. *Иванов В.А., Изумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины. 2007. – 258 с.
7. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 207 с.
8. *Eremeev V.N., Suvorov A.M., Khaliulin A.Kh., Belokopytov V.N., Godin E.A., Ingerov A.V.* Oceanographic characteristics of the Black Sea: Data base and Digital atlas. – Sevastopol: NOAA – ESDIM, 2003. – CD version.
9. *Шульман Г.Е., Урденко С.Ю.* Продуктивность рыб Чёрного моря. – Киев: Наукова думка, 1989. – 188 с.