

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНО УПРАВЛЯЕМОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАПАСОВ СУБПОПУЛЯЦИОННЫХ ГРУПП ПРИ АГРЕССИВНЫХ ИНВАЗИЯХ

А.Ю. Переварюха

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я лин. Васильевского острова, 39
E-mail: madelf@gambler.ru

Ключевые слова: задачи управления биоресурсами, модели инвазий в Каспийском море, деградация запасов осетровых, гибридные модели, бифуркации удвоения и циклы.

Аннотация: Доклад посвящен вычислительному моделированию биофизических процессов при факторах гетерогенной адаптации и управляемой эксплуатацией запасов с нелинейными зависимостями в эффективности воспроизводства. Пластичность и изменчивость основа эволюции в естественных биофизических системах. Комплекс поведенческих и биохимических приспособлений позволял осетровым рыбам Каспия эффективно использовать ограниченные ресурсы и выдержать конкуренцию, но избыточный промысел и инвазии чужеродных видов привели к деградации биоресурсов. При длительной совместной эволюции в сообществах организмов Каспия возникла специфическая адаптация, оптимальная для физических условий Каспия стратегия выживания, которая не была учтена при управлении промыслом. В разработанные модели включена логика экспертной регуляции промысла. Показано в результате моделирования на основе разработанных гибридных переопределяемых структур, что стратегия регуляции должна учитывать нестабильность одной из групп популяции.

1. Введение

Актуальная тема для биофизической кибернетики и моделирования решение вопроса о степени влияния сложной популяционной структуры, под которой нами понимается разделение на несколько отличающихся по репродуктивному поведению групп особей данного вида, на успешность удержания или расширения видом своего ареала. Для оптимального управления ресурсами ценных для экономики популяций необходимо совершенствование математических методов прогнозирования количественного соотношения групп, так как при управлении промыслом экспертам, выделяющим квоты, не известно их исходное распределение в общей популяции и вклад в восполнение биоресурсов. В рассматриваемой проблеме гибридные биофизические модели с формализацией экспертного регулирования эксплуатацией биоресурсов связаны с установленными важнейшими факторами биофизической гетерогенности популяции в ограниченном ареале. Варианты жизненного цикла возникли из-за адаптации локальных популяций к физической гетерогенности среды [1]. Место размножения длинная пресная река, молодь попадает из устья Волги в эстуарий с солоноватой водой 5‰. Половое созревание проходит в соленом море с высоким градиентом солености при движении в Южном Каспии до 14‰, но взрослые осетровые могут жить и в океанической воде. Осетровые виды рыб были способны

выживать и в озере Байкал, и в Аральском море, обладая уникальной пластичностью к физике среды, но для освоения ареала им нужны локальные адаптивные субпопуляции.

Изложенные в статье аспекты отражаются в технологической проблеме: нет эффективной методики реинтродукции находящихся под угрозой исчезновения видов в естественную среду. Для осетровых Каспия не решена проблема создания адекватной технологии, несмотря на усилия по массовому выпуску молоди. Выпущенная молодь из прудов не возвращается в реки в ожидаемом экспертами проценте от объемов выпуска. Теория автора в том, что технология выращивания и выпуска особей не формирует нужного для них адаптивного поведения, которое возникает при естественной миграции, но создает избыточно высокую конкуренцию за пищевые ресурсы в местах выпуска. Эти два фактора взаимно накладываются, усиливая негативный аспект, что мы покажем в модели в сценарных экспериментах при регулируемом воздействии.

Цель наших исследований – предложить применимый для практики биохимический метод дифференциации групп и на основе полученных данных усовершенствовать в дальнейшем математическую модель репродуктивного процесса популяций при заданном алгоритме изменения промыслового воздействия и оценить эффективность пополнения для каждой группы с учетом инвазий новых видов.

2. Особенности управления эксплуатацией при образовании репродуктивных групп

Популяционная репродуктивная дифференциация ускользала от внимания математической биофизики. Во всех классических моделях популяции хищника и жертвы однородные. В естественной среде отношения сложнее, чем в модельных уравнениях. Далеко не все особи одного поколения созревают и размножаются одновременно. Группы особей пропускают сезоны размножения. Периодически нарушается гендерный баланс в местах размножения, так как время полового созревания самцов и самок осетровых из одного поколения существенно различается. Самцы созревают на 2 или 3 года раньше самок, но самцы не интересны для промысла. Разрешенную квоту на вылов стремились выбрать за счет самок из-за их икры, что губило восполнение биоресурсов. Квотирование промысла не гарантирует отсутствие риска коллапса популяции. Квотирование очень ненадежный метод регулирования природопользования.

Для осетровых рыб в ареале Каспия создание субпопуляционных группировок важнейшая форма адаптации, позволяющая им использовать ограниченные пригодные для размножения площади максимально. Высокая адаптивная способность и большая индивидуальная плодовитость позволяла осетровым видам рыб длительно с конца 19 века и до 1990 годов выдерживать чрезвычайно интенсивное и научно необоснованное антропогенное воздействие.

В результате неадекватной регуляции промысла в условиях нарушения физической среды воспроизводства и гидрологического режима рек к 1991 г. произошел стремительный коллапс четырех популяций. Однако, в это время с 1980 г. проводилась массовая интродукция искусственно выращенной молоди в Волгу, на рис. 1 показаны графики и вылова, и выпуска молоди рыб. Вопрос о том, куда исчезала выпускаемая молодь осетровых рыб остается без официального ответа. Выживаемость молоди в Каспии не достигала прогнозируемого значения в 3%, но приблизительно не превосходила 0.5%. Это не только проблема для вычислительного моделирования, мониторинга состояния популяций, но и задача для гидрофизических исследований. Воспроизводство осетровых при их чрезмерном изъятии планировалось поддерживать искусственной интродукцией выращенной молоди, но как мы видим по результатам

промысла, эффективность искусственных мер по выпуску молоди оказалась чрезвычайно низкой. Популяции осетровых рыб Каспия не являются управляемыми путем искусственной интродукции. Завышенные ожидания от выпуска молоди существенно исказили экспертные промысловые прогнозы и привели к завышению доли изъятия из популяции, которая на самом деле не получала ожидаемого пополнения нерестовой части популяции за счет выпуска неадаптированной молоди.

Технология выпуска молоди непосредственно в море не соответствовала эволюционно сложившейся физиологии изменений осмотической регуляции молоди при её миграции к морю. Выпуск молоди крупными партиями в реку приводил к концентрации в этих зонах хищников. Технологический процесс искусственного выращивания осетровых не учитывал особенности приспособления видов. В прогнозах уровня промыслового изъятия использовался установленный по экспертным оценкам процент возврата искусственной молоди. Нереалистичные прогнозы возврата выпущенных особей и завышение оценки численности популяций стали важным фактором избыточного промыслового изъятия и деградации биоресурсов Каспия.

Все экономически ценные популяции Каспия сейчас находятся на грани исчезновения, так как нелегальный промысел продолжен. Останавливать браконьеров региональные правительства не имеют мотивации из-за коррупции. В результате воздействия изменилось соотношение видов в структуре биоты Каспия. Теперь активно размножились те виды, которые ранее уничтожались, так как были объектами питания крупных осетровых. Усилились инвазионные процессы. Малоценные для экономики популяции чужеродных видов занимают свободную трофическую нишу в Северном Каспии. Органика накапливается донными организмами и это привело к физическому изменению и перераспределению потоков органических веществ. Субпопуляционные группы образуются и по физическим (адаптация к среде) и экологическим (избежание конкуренции) причинам. Чаще всего наблюдается географическое разделение групп особей из-за физических барьеров. Однако, репродуктивная изоляция возможна и в одном ареале, если у групп различаются время начала и продолжительность репродуктивного цикла.

Для экономики и нормирования природопользования интересны сложившиеся субпопуляционные репродуктивные группы особей, которые отличаются продолжительностью и сроками миграций из моря в реки. В российской экологии две репродуктивные группы называют «озимые» «winter case» и «яровые» «spring case» из-за разного времени захода из моря в реки – осенью с зимовкой или весной. Аналогии из посевов пшеницы не содержат заложенного эволюцией биофизического смысла. Термины не отражают, что важнейший фактор не только время захода из моря в реку, но продолжительность пресноводной миграции и взрослой рыбы и родившейся в реке молоди. Осенние особи зимуют в реке и могут подняться далеко по течению. Весенние «Vernal» группы быстро возвращаются обратно в море. Эта тактика ведет ко многим отличиям. Очевидно, что адаптацию к морской соленой воде особи этих двух групп испытывают в разном возрасте. Фактор не учитывается при искусственном выпуске выращенной в прудах молоди, где физические условия далеки от естественных физических условий. Ранее мы при моделировании показали, что массовый одномоментный выпуск молоди создает чрезвычайно высокую конкуренцию и увеличивает смертность в критический период жизни на фоне стресса особей, попавших в среду с другими физическими параметрами и не имеющих навыков скрытного поведения. Факторы нарушения субпопуляционной принадлежности при произвольном скрещивании не менее важные в динамике выживаемости выпускаемой в незнакомую среду молоди.

3. Моделирование динамики при управляемой эксплуатации субпопуляционных групп

Нерациональное распределение промыслового изъятия по конкурирующим внутрипопуляционным группам и игнорирование миграционных адаптаций при искусственном воспроизводстве осетровых сыграли важную роль в современном критическом состоянии этих многочисленных и ценных ранее популяций. Роль и механизмы внутри популяционного распределения исследованы недостаточно. Методов, позволяющих визуально идентифицировать рыб различных субпопуляций, не разработано. Популяционные группы далеко не только вопрос физиологии, но аспект инженерной физико-технической проблемы организации интродукции особей в естественную среду. Данные о распределении групп необходимы для математического моделирования и оценки эффективности мер по искусственному восстановлению популяций, которая ранее была низкой.

Функциональной основой для моделирования эффектов спорадически возникшей дифференциации репродуктивного процесса осетровых Каспия на группы внутри структурированной популяции является совокупность физиологических и биохимических процессов. Эти процессы у сезонных рас определяют интенсивность активного и генеративного обменов, различную динамику накопления, а главное, последующего расходования энергетических запасов организма в условиях повышенных мышечных нагрузок. Основным у осетровых рыб является отбор по физиологическим и биохимическим параметрам, позволяющим оптимальным образом приспособиться к длительному нахождению в осмотически различных средах (море, река). Именно эти параметры в исследуемой проблеме определяют изменения генетической структуры популяций при относительном постоянстве морфологических признаков. Эти факторы определяют в модели динамику выживания поколений.

Изолирующие механизмы, действующие на разных нерестовых реках или в пределах одной реки принципиально сходны. В обоих случаях это территориальная разобщенность нерестилищ и одновременность нереста. В результате создаётся экологическая дифференциация на самом важном этапе онтогенеза – периоде размножения. Генетические различия между сезонными расами – это продукт длительной эволюции популяций в конкретных условиях.

На основе разработанных нами представления непрерывно-событийного времени и предикативно-переопределяемых структур для биофизических процессов со стадийностью развития сформируем гибридную модель динамики формирования новых поколений по стадиям развития, дополненную вспомогательными уравнениями ситуативного характера. Набор вспомогательных уравнений для сопутствующих показателей развития поколений позволяют гибко настраивать гибридную вычислительную структуру для специфических ситуаций наличия популяционной дифференциации или включения действия дополнительных факторов физической среды, связанных с влиянием температуры, скорости течения и площади нерестилищ.

Модель репродуктивной активности будем строить на основе формализации различного жизненного цикла у конкурирующих групп. Логично задать динамику численности поколений двух субпопуляционных групп двумя гибридными структурами, описывающим переходы между стадиями развития.

Используем следующую организацию структуры ранее предложенной модели формирования поколений популяции для двух групп, где стадийность будет задана различным образом. Длительность стадий развития у двух групп различается значительно из-за разных миграционных маршрутов. Осенняя группа поднималась высоко по течению реки Волги на тысячу километров. Молодь осетровых рыб этой

группы проходила обратный маршрут на пути к морю, взрослая и набирая массу в реке, но потом все равно приспособилась к морской воде.

Для моделирования ситуации при длительной миграции задействуем в гибридной системе модели выживаемости поколения от начальной численности икры $N(0)$ до полового созревания на отрезке гибридного времени три стадии развития с различной формой записи убыли численности поколения: α по трем стадиям развития и общим для всех β с запаздыванием ξ . Включим уравнение для скорости роста особей $w(t)$ в зависимости от плотности особей и вспомогательное логистическое уравнение динамики кормовых организмов $g(t)$, влияющей на рост $w(t)$ особей поколения:

$$(1) \quad \begin{cases} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t)/w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}}, w(0) = w_0 \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K}\right), g(0) = g_0 \end{cases}$$

Для второй группы используем в системе уравнений только две стадии с влиянием на убыль поколения начальной численности, добавим температурную поправку и включим коэффициент потребления молодью рыб кормовых организмов.

4. Заключение

В результате получим при численном решении для двух гибридных модельных структур графики эффективности воспроизводства как зависимости $R=f(S)$, связывающей исходный родительский запас S и полученное популяцией новое половозрелое поколение как пополнение биоресурсов R по теории «запаса и пополнения» созданной ранее W.E. Ricker [2]. Дополнять уравнения в (1) модели убыли поколений вспомогательными уравнениями предложил можно разнообразными методами [3], где событийное время позволит включать управляемое воздействие.

Математическую форму для записи отсчетов событий управления во времени как «гибридное иерархическое непрерывно-событийное» модельное время [4] для моделирования на основе предикативно-переопределяемых структур в задачах биофизики мы описали в предыдущих работах на основе вложенных кортежей.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 23-21-00339 в СПб ФИЦ РАН. Выполнено в рамках бюджетной темы СПб ФИЦ РАН (руководитель Юсупов Р.М.).

Список литературы

1. Алтухов Ю.П. Внутривидовое генетическое разнообразие: мониторинг и принципы сохранения // Генетика. 1994. Т. 31, № 10. С. 1333-1357.
2. Ricker W.E. Stock and Recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1954. Vol. 11. P. 559-623.
3. Переварюха А.Ю. Неопределенность асимптотической динамики при моделировании процесса управления биоресурсами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 3. С. 140-148.
4. Переварюха А.Ю. Моделирование эффекта волнообразной кривой воспроизводства популяций рыб // Экологические системы и приборы. 2008. № 8. С. 41-44.