

УДК 519.6, 573.7

В. В. МИХАЙЛОВ, А. Ю. ПЕРЕВАРЮХА

## МОДЕЛЬ СЦЕНАРИЯ ИНТРОДУКЦИИ МОЛОДИ РЫБ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)*

*Рассматривается расширение ранее сформулированного подхода к моделированию аспектов репродуктивного цикла с учетом происходящих перемен в среде обитания и метаморфозов в развитии рыб. Избыточное накопление биогенных элементов при длительном использовании водоемов для искусственного выращивания молоди или ускоренный распад органики в некоторых случаях могут оказывать влияние на успешность процесса воспроизводства, косвенно влияя на долговременные тренды популяционной динамики. В отдельных случаях усиление притока органического фосфора приводит далее к состоянию эвтрофикации и может сказаться на недостаточной аэрации мест размножения, привести к гипоксии у вылупившихся личинок. При массовой гибели икры еще ухудшится ситуация с расходом кислорода в водоеме. Нехватка органики приводит недостаточно для оптимального роста рыб развитию биомассы кормовых планктонных организмов. Система уравнений выживаемости конкурирующих особей поколения дополнена функциональным расширением, использующим итерационную модель динамики биогенных элементов, построенную на основе анализа процессов в экосистеме озера Чао. Блок модели расчёта притока и деструкции органики синхронизирован с непрерывно-дискретной вычислительной структурой, учитывающей взаимосвязанные изменения факторов смертности и темпов развития молоди рыб при переходах между обобщенными эколого-физиологическими этапами развития.*

**Ключевые слова:** модели популяций, эвтрофикация, трофодинамика водоемов, темпы накопления биогенов, аспекты эффективности воспроизводства, предикативно переопределяемые структуры, этапы онтогенеза.

### Введение

В цикле работ мы последовательно совершенствуем возможности применения сценарного подхода и вычислительных моделей динамики видов, онтогенезу которых свойственны выраженные комплексные эколого-физиологические метаморфозы. В работе [1] была предложена математическая формализация влияния темпов развития молоди анадромных рыб, испытывающих запрограммированные эволюцией изменения, на итоговую выживаемость численности промыслового пополнения. Предлагаемый подход предназначен главным образом для анализа критических режимов существования важных промысловых популяций.

Общей задачей исследований Проекта является анализ вычислительных модельных сценариев смены фаз и факторов при исчерпании биоресурсов или ускоренном размножении. Мы успешно рассмотрели факторы внутривидовой конкуренции за медленно возобновляющиеся ресурсы, действие которой на

темпы роста немонотонно может зависеть от численности группы особей. Для общего жизненного цикла большинства костистых рыб накопление биомассы удовлетворительного описывается семейством сигмоидных кривых, получаемых из балансового уравнения Бергаланфи, то для важного интервала наибольшей уязвимости на ранних этапах развития прирост невозможно описать одним уравнением. Система предикативно переопределяемых дифференциальных уравнений динамики убыли поколений исходно предполагала отдельную формализацию изменений факторов смертности, связанных с плотностью скопления и прочих, независимых от плотности. Как справедливо отметили коллеги биологии, темпы развития зависят не только от внутривидовой регуляции, но и от внешних условий. Если условия протекания физиологических процессов остаются постоянными, то в модели учет лишних факторов не повлияет на итоговые выводы, так как действует математическое поня-

тие о топологической эквивалентности устойчивых многообразий. Интересно рассматривать влияния вызывающие появления топологически неэквивалентных фазовых портретов динамических систем, как это происходит при некоторых бифуркациях асимптотически устойчивых стационарных состояний траектории или качественных изменений границ области притяжения при сосуществовании альтернативных аттракторов.

Для подобной задачи перспективно в вычислительную модель выживаемости молодежи инкапсулировать выходные переменные блока расчета биогенных элементов, через механизм опосредованного влияния, для чего опишем оригинальную формализацию темпов развития.

### Градации трофического состояния среды

Принято классифицировать водоемы по их биологической продуктивности в зависимости от трофического статуса, определенного уровнем содержания биогенных элементов как дистрофные, олиготрофные, мезотрофные и эвтрофные – наиболее насыщенные органикой. Однако, как бы странным не казалось на первый взгляд математика, в экологии далеко не всегда обилие питательной среды положительный фактор для биоразнообразия. Антропогенная эвтрофикация вплоть до критического гипертрофического состояния становится одной из актуальных проблем для замкнутых экосистем при антропогенной нагрузке [2]. Для Волго-Каспийского региона проблема эвтрофикации и летнего цветения воды является острой, но мало обсуждаемой, однако в англоязычной Википедии для иллюстрации масштабов данного явления приведен спутниковый снимок акватории всего Северного Каспия.

Отдельное моделирование динамики внешних факторов предполагает анализ реальных происходящих процессов в трофической цепи водоема. Параметрическая верификация модели баланса биогенных элементов, накопления и распада органики, нетривиальная задача, не решаемая вычислительными алгоритмами, и требует специальных экспедиционных исследований и обработки неполных данных. Расчет продукционных показателей экосистемы озер обычно проводится по среднегодовой концентрации общего фосфора. Адаптируем

для моделирования эффективности воспроизводства наработки по прогнозированию состояния озера Чао (провинция Хэфей, КНР), где проводились исследования в рамках международного проекта с участием лаборатории Института информатики РАН [3], и накоплены статистические данные по гидрохимии, позволившие провести верификацию структуры эмпирических зависимостей, прежде всего для формализации связи среднегодовой концентрации общего фосфора с концентрацией хлорофилла в оптимальных условиях освещенности ( $A_{OPT}$ ).

### Концептуальная формализация круговорота биогенных элементов

Ситуация озера Чао представляет интерес для нашей основной задачи совершенствования математических методов описания репродуктивного цикла анадромных рыб, так как отражает его основные особенности как модельного эталонного объекта условий раннего нереста: малую глубину и высокую проточность, низкую прозрачность, связанную с ослаблением света частицами донных отложений, относительно низкую величину интегральной первичной продукции. В 1996 г. трофический уровень озера повысился до гипертрофного, что привело к качественным изменениям процессов высвобождения минерального фосфора из донных отложений при дефиците кислорода с угнетением аэрофильных видов.

Принципы моделирования цикла круговорота органических веществ, направлению «трофодинамики», были заложены работами ленинградской научной школы Г. Г. Винберга [4], изучавшего аспекты скорости образования первичной продукции различных водоемов. Им был разработан простой, но до сих пор эффективный метод «двух пробирок» для оценки продуктивности водоема, где одна из сравниваемых проб оставалась в прозрачной пробирке с возможностью фотосинтеза, а другая закрывалась от излучения, и там происходило только окисление. Сравнение содержания кислорода через равные промежутки времени могло говорить об образовании органического вещества в водоеме, если конечно репрезентативно распределить опыты по глубинам. Естественно, так мы получим усредненную информацию, но такие сведения позволяют сделать

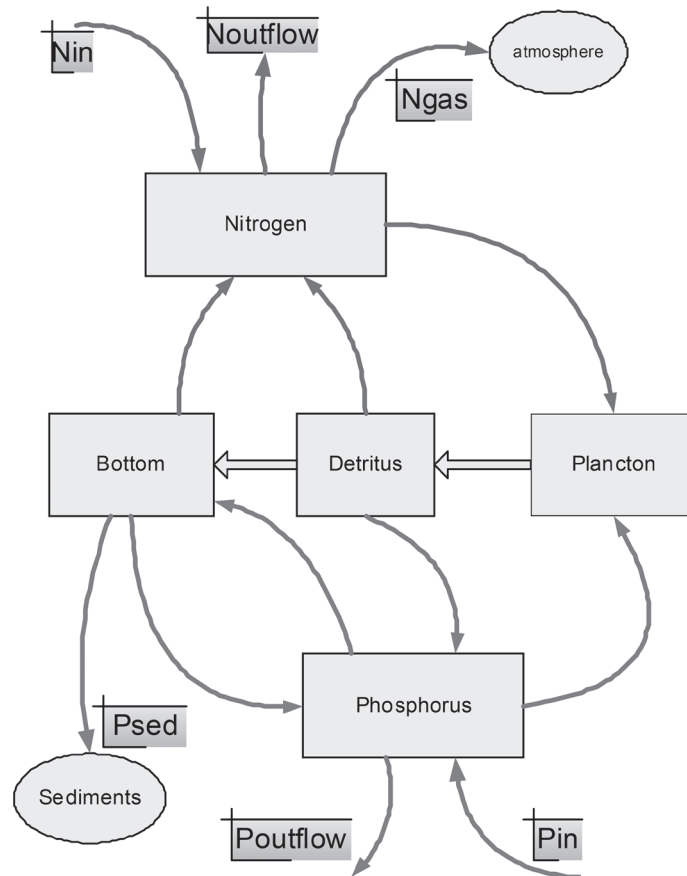


Рис. 1. Схема перераспределения азота и фосфора

вывод о формировании долговременного тренда в условиях развития фитопланктона, доминировании накопления осаждающейся органики по пути *Plancton*→*Detritus*→*Bottom* или ее окислении и выхода в атмосферу. Концептуальная схема (в традиционном стиле нотации потоков системной динамики Дж. Форрестера) круговорота органического азота *Nitrogen* (синими стрелками) и фосфора *Phosphorus* (красными стрелками) показана на рис. 1.

Для построения модели с расчетами динамики биогенов в различных сегментах среды не требуется применение изощренного математического аппарата интегральных уравнений, скорее необходима удачная структуризация принципов протекания круговорота основных элементов и эмпирический подбор значений показателей степени при коэффициентах трансформации, которые в эвтрофных и олиготрофных случаях могут различаться. Количество азота и фосфора, заключенного в годовой первичной продукции и перешедшего в результате деструкции в минеральную форму будут величинами, характеризующими в моде-

ли интенсивность биологического круговорота. Образование фитопланктона, согласно имеющимся обширным наблюдениям В. В. Бульона [5], достаточно сложно зависит от концентрации органического азота и фосфора, и может выражаться нелинейной функцией. Аналогично определим нелинейную зависимость для темпов разложения и минерализации осаждающегося детрита в последовательно составленном алгоритмическом блоке.

#### Блок динамики биогенных элементов

Исходя из рассмотренной ранее лимнологической характеристики объекта, в агрегированный модельный блок целесообразно включить перечисленные далее показатели трофического состояния, динамически связанные на основе эмпирически определенных функциональных зависимостей. Агрегированную модель разделим на функциональные сегменты:

**I.** Концентрация хлорофилла  $CHL$ , прозрачность  $S$ , первичная продукция в оптимальном по освещенности слое  $A_{OPT}$ , среднесуточ-

ная  $AD$ , и годовая  $AY$  интегральная первичная продукция, где  $VEG$  – время вегетации

$$CHL = 0.28 \cdot TP_s^{0.96}; A_{OPT} = 30.6 \cdot CHL^{0.927};$$

$$S_1 = 5.7 \cdot CHL^{-0.44}; E_1 = \ln(0.05) / S_1;$$

$$E_2 = 1 / (k_1 \cdot Z^{k_2} + 1); E_S = E_1 + E_2;$$

$$S = \ln(0.05) / E_S; AD = A_{OPT} \cdot S; AY = AD \cdot VEG.$$

**II.** Седиментация детрита  $CRD$ . Здесь  $V$  – скорость осаждения детрита (м/сут),  $\tau_i$ ,  $\alpha_i$  – постоянная времени разложения (сут) и доля лабильной, промежуточной и консервативной фракции детрита  $\tau_1 = 1$ ,  $\tau_2 = 20$ ,  $\tau_3 = 365$ ,  $\alpha_1 = 0.15$ ,  $\alpha_2 = 0.8$ ,  $\alpha_3 = 0.05$ ,  $V = 0.175$ .

При  $Z \leq 2S$ :

$$CRD = \sum_{i=1}^3 0.5 \cdot A_{OPT} \cdot V \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \cdot (1 - \exp(-Z / (V \cdot \tau_i)));$$

При  $Z > 2S$ :

$$CRD = \sum_{i=1}^3 0.5 \cdot A_{OPT} \cdot V \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \cdot (1 - \exp(-2S / (V \cdot \tau_i))) \times \exp(2S - Z) / (V \cdot \tau_i);$$

$$CR = CRD \cdot VEG.$$

**III.** Седиментация азота  $NR$  и фосфора  $PR$  в составе детрита,  $cn$ ,  $cp$  – соотношение углерод-азот и углерод-фосфор в детрите

$$NR = CR / cn; PR = CR / cp.$$

**IV.** Минерализация органического азота  $STN$  и фосфора  $STP$ ,  $NRR$ ,  $PRR$  – количество органического азота и фосфора, поступающее в активный слой отложений. Коэффициент минерализации  $k1 = 0.4$

$$STN = NR \cdot k1; STP = PNR \cdot k1;$$

$$NRR = NR - STN, PRR = PR - STP.$$

**V.** Минерализация и захоронение органического азота ( $NORGM$ ,  $NORGZ$ ) и фосфора ( $PORGM$ ,  $PORGZ$ ) активного слоя отложений.  $NORG$ ,  $PORG$  – количество органического азота и фосфора в активном слое  $k2 = 0.017$ ,  $k3 = 0.0066$ .

$$PORGM = PORG \cdot k2; PORGZ = PORG \cdot k3;$$

$$NORGM = NORG \cdot k2; NORGZ = NORG \cdot k3;$$

**VI.** Отдельно проведем расчет и внесение поправок в коэффициент выноса фосфора в воду  $k4$  и коэффициент десорбции  $k5$ . Нас интересует расчет выноса в воду  $PPMV$ , где сорбция  $PPMS$  минерального фосфора порового раствора  $PPM$ , десорбция  $PSDS$  и захоронение  $PSS$  сорбированного фосфора  $PS$  активного слоя донных отложений. Важнейшая характеристика

$PLIM$  – граничное значение содержания органического вещества (в долях фосфора) в донных отложениях, при котором наступает дефицит кислорода. Установлено  $k4 = 0.045$ ,  $k5 = 0.002$ ,  $k6 = 0.1$ ,  $k7 = 0.0065$ .

Алгоритмически для расчета поправок применим схему

$$kkk = 0;$$

$$if (PORG + PR) > PLIM$$

$$kkk = (PORG + PR - PLIM);$$

$$k4 = 0.045 + k4 \cdot kkk; k5 = 0.002 + k5 \cdot kkk;$$

end

И рассчитаем выносы биогенов уже с поправками

$$PPMV = PPM \cdot k4; PPMS = PPM \cdot k6;$$

$$PSDS = PS \cdot k5; PSS = PS \cdot k7;$$

**VII.** В заключительном сегменте модели определим общее выделение минеральных соединений азота  $NVV$  и фосфора  $PVV$  в воду. Пересчет органического, минерального и сорбированного фосфора и органического азота активного слоя донных отложений для следующего шага счета рассчитывается линейно

$$NVV = STN + NORGM; PVV = STP + PPMV.$$

$$NORG(t+1) = NORG(t) + NRR - NORGM - NORGZ;$$

$$PORG(t+1) = PORG(t) + PRR - PORGM - PORGZ.$$

$$PPM(t+1) = PPM(t) - PPMV - PPMS + PORGM + PSDS;$$

$$PS(t+1) = PS(t) - PSDS - PSS + PPMS + PSV.$$

Таким образом, в балансе азота и фосфора в водной массе учитывается внешняя биогенная нагрузка, седиментация органического и минерального фосфора, поток азота и фосфора из отложений в воду, потери с водным стоком. После подведения всех балансов рассчитывается концентрация общего азота и фосфора для следующего шага итерации. Теперь необходимо инкапсулировать сегменты блока динамики биогенных элементов в рассмотренную ранее модель эффективности воспроизводства в форме уравнений выживаемости на интервале наибольшей уязвимости  $[0, T]$  в раннем онтогенезе, который можно разделять на этапы.

### Непрерывно-дискретная структура модели популяции

При модификации модели выживаемости применим следующие биологически обоснован-

ные гипотезы. Дефицит кислорода в донных отложениях не стратифицированных водоемов связан с количеством органического вещества в них, следовательно существует граничный уровень органического вещества, при котором возникают в придонном слое анаэробные зоны. Существует оптимальное значение концентрации биогенных элементов, тогда как отклонения от оптимума могут воздействовать на скорость роста молоди и выживаемость. Тогда воздействие динамики растворенных биогенов целесообразно описать через возникающее отклонение в темпах размерного развития молоди. Замедленное развитие поколения молоди в свою очередь опосредованно действует на скорость убыли численности поколения, или в альтернативном способе формализации удлиняет интервал уязвимости  $[0, T_1]$ ,  $T_1 > T$ . Необходимо модифицировать базовую систему дифференциальных уравнений убыли численности поколения с учетом воздействия колебаний факторов среды для ситуации низкой эффективности выращивания в непроточном водоеме молоди рыб с целью последующей её интродукции. Изначально базовая модель (1) описания убыли численности от  $N(0)$  в виде системы двух уравнений на отрезке времени составляющим интервал уязвимости  $t \in [0, T]$  до момента  $R = N(T)$  с начальными условиями уравнений  $N(0) = \lambda S$ ,  $w(0) = w_0$ ,  $k \in [1/2, 2/3]$

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \theta(S)\beta)N(t), \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \sigma}, \quad \theta(S) = \frac{1}{1 - e^{-cS}}. \end{cases} \quad (1)$$

была дополнена вспомогательным параметром индивидуального развития поколения  $w(t)$ , отражающим и изменения пищевых потребностей по мере развития особей, модифицируем альтернативным образом.  $\theta(S)$  – триггерный функционал действия эффекта Олли  $\lim_{S \rightarrow \infty} \theta(S) = 1$ , который в следующей работе мы планируем дополнить стохастической составляющей. Разделенные компенсационные  $\alpha$ -факторы и декомпенсационные  $\beta$ -факторы убыли численности тогда предполагались регулируемыми в зависимости от различных явлений.

Множество решений задач Коши для всех допустимых  $S \in Z^+$  определит интересующую нас зависимость  $\psi$  от исходного запаса  $S$ . Применяя получаемое в вычислительной среде ре-

шение задачи Коши (1) в виде оператора эволюции функциональной итерации  $R_{n+1} = \psi(R_n)$  удалось нарушить критерий возникновения каскада бесконечных удвоений периода цикла  $p = 2^i, i \rightarrow \infty$ , сохранив единственный экстремум зависимости  $R_m = \max \psi(S)$ . Методом получено необходимое для биосистем свойство бистабильности точек траектории  $\left\{ \psi^n(x_0) \right\}_{n=0}^{\infty}$ , что для областей  $\Omega_1, \Omega_2 \in \mathfrak{R}^+$  и точки  $R_1 \notin \Omega_1 \cup \Omega_2$ ,  $(\Omega_1 \cap \Omega_2) = \emptyset$  выполняется

$$\begin{aligned} \forall x \in \Omega_1 \subset \mathfrak{R}^+ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(x) = 0, \forall y \in \Omega_2 \subset \mathfrak{R}^+ : \\ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(y) = R^*, \partial_{\mathfrak{R}} \Omega_1 \equiv \partial_{\mathfrak{R}} \Omega_2 = R_1 < R^*. \end{aligned}$$

Исследовалась в (1) потеря устойчивости стационарных точек, как для критического случая  $|\psi'(R^*)| = -1$ , так и для  $|\psi'(R^*)| = 1$ , влекущего образование циклов порядка Шарковского:  $\psi^{n+p}(R^*) = \psi(R^*)$ ,  $p \neq 2^i, i = 1 \dots \infty$  после появления касательных бифуркаций у дискретной составляющей траектории гибридной динамической системы, включающей событийную составляющую моментов  $\{\tau_1, \dots, \tau_i\} \in t$  в онтогенезе рыб. Гибридное время  $\mathfrak{G}$  формируется в виде набора упорядоченных интервалов, где вводится компонента событийности для фиксации изменений непрерывного процесса

$$\mathfrak{G} = \bigcup_n \{L_{gap}, [t_{n-1}, t_n], R_{gap}\}. \quad (2)$$

где  $L_{gap}, R_{gap}$  – правая и левая «временная щель» для выделения событий с мгновенной длительностью. Так как исследуются метаморфозы дискретной составляющей траектории, то подход позволит координировать расчеты на конце интервала времени до начала нерестового цикла с пошаговой структурой сегментированного блока биогенных элементов.

### Агрегированная модель выживаемости молоди

В рассматриваемой задаче существуют признаки сценария, в котором показатель скорости развития способен получить более значимую роль, ранее мы уже описали фактор взаимодействия внутри группы. В рассматриваемом случае существуют факты, которые трудно объяснить иначе как существенным отклонением от гидрохимического оптимума развития молоди, по мере наращивания объемов молоди органика осаждалась в отложениях. Неиз-

бежно происходят изменения трофического статуса использовавшихся водоемов, что осложняется условиями неоптимальной повышенной температуры. Накопление избыточной органики в илистом слое процесс медленный, но как часто бывает вялотекущее нарастание негативных факторов сложнее обнаружить и своевременно предотвратить, как это отмечено нами ранее для сценария стремительного коллапса запасов трески спустя 15 лет после перелома. Отмечалось ихтиологами [6], что процент промыслового возврата при небольших объемах выпуска заводской молоди на естественной кормовой базе в 1970 г. был значительно выше, чем при массовой интродукции в 1980-е гг. В итоге из-за действия целой совокупности прямых и опосредованных факторов эффективность искусственной интродукции осетровых оказалась значительно меньше ожидаемой по планам рыбного хозяйства [7].

Положим, что в естественной среде есть оптимальная скорость развития, тогда как отклонения, вызываемые неблагоприятной трофической обстановкой, не способствуют выживаемости. Помимо конкуренции внутри группы на развитие оказывают влияние темпы восстановления кормовой базы и обеспеченность кислородом, напрямую зависящие от текущего динамики содержания биогенных элементов. Эталонные темпы мы зададим, взяв за основу известное уравнение Бергаланфи, где указан общий баланс для соотношения эффективности анаболизма  $\eta$  и катаболизма  $\vartheta$

$$\frac{dW}{dt} = \eta \sqrt[3]{W^\zeta(t)} - \vartheta W^\sigma(t) \quad (3).$$

Для вычислительных исследований (3) предоставляет достаточную вариативность. (3) используется обычно в частном решении, случае  $\sigma = 1$ . Для рыб считают  $\zeta = 2$

$$W_t = \left( \eta / \vartheta - \left( \eta / \vartheta - \sqrt[3]{W_0} \right) e^{-\vartheta t / 3} \right)^3.$$

Описание прироста одной зависимостью накопления и распада биомассы на протяжении всего жизненного цикла вряд ли биологически обосновано, потому для ранних стадий онтогенеза молоди мы можем варьировать показатели, и  $\sigma$  может отличаться от единицы. Будем считать (3) идеальной моделью, с которой реально сравнивать вариации. Прежде

всего, интересно рассмотреть влияние конкуренции внутри группы согласно теории «запас-пополнение» Рикера [8] на динамику индивидуального развития в контексте отклонения гидрохимической обстановки среды от оптимального диапазона. Внесем влияние, оказываемое плотностью скопления и динамикой биогенов на показатели эффективности анаболизма

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\eta}{\xi v_1(NVV)v_2(PVV)} \sqrt[3]{w^\zeta(t)} - \vartheta w^\sigma(t), \quad (4)$$

где давление конкуренции за пищевые ресурсы в группе мы отразим функциями, и где будет учтено усиление конкуренции при неблагоприятной обстановке

$$v_1(x) = \frac{x}{z_1 \exp(-bx(Ye^{-px} + 1))},$$

$$v_2(x) = \frac{x}{z_2 \exp(-bx(Y_1e^{-px} + jxN(0)))}.$$

Значения, соответствующие минимумам  $v_1(NVV)$ ,  $v_2(PVV)$  будут считаться оптимальными. Существуют противоречивые результаты исследований об ускорении темпов развития и увеличении сопутствующих морфометрических характеристик при малой плотности молоди волжской севрюги в выростных водоемах, успех питания связан с групповым поведением.

Включим показатель отклонения от идеального развития в виде, заведомо не меняющей знак слагаемого в правой части

$$\Delta_{Wt} = \sqrt{(W(t) - w(t))^2},$$

модифицировав первое уравнение убыли, представленной в инструментальной среде моделирования в форме гибридной системы

$$\frac{dN}{dt} = -(\alpha \Delta_{Wt} N(t) + \beta \Psi(S)) N(t). \quad (5)$$

где триггерную функцию, отражающую действие эффекта Олли на эффективность нереста с необходимым свойством ограниченного действия  $\lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1$  определим так  $\Psi(S) = 1 + \exp(-\kappa S^2)$ . Базовую систему уравнений (2) можно расширить в форме динамически перепределяемой вычислительной структуры на интервалах, соответствующим эколого-физиологическим стадиям развития молоди, как показано нами в [9].

Рассмотренный ранее вариант модификации структуры с динамическим переопределением темпов размерного развития второго уравнения в (2) тремя разными уравнениями выглядит мало обоснованным для модельных сценариев оценки эффективности искусственного воспроизводства рыб, скорее подходит для особенностей онтогенеза насекомых-вредителей. Альтернативный способ формализации давления чрезмерной концентрации биогенов через влияние непостоянства интервала  $t \in [0, T = f(PVV) \circ f_1(NVV)]$  более сложно реализуем при вычислениях моментов  $t_n$  с плавающей границей временных кадров.

### Заключение

Таким образом, сформирован блок динамики биогенных элементов и опосредованно через показатель темпов развития отразили в итоговой выживаемости поколения при прохождении интервала уязвимости в онтогенезе рыб влияние общего накопления органического фосфора и азота. Разработанная вычислительная модель не относится к наиболее общему типу феноменологических популяционных моделей, как классические уравнения математической биологии Ферхюльста или Вольтерра, асимптотика которых не зависела от начальных условий. Расширения базовой модели предназначены для вариативного сценарного исследования эволюции некоторого исходного экологического состояния, задаваемого набором основных важнейших характеристик репродуктивного процесса и внешних воздействий, такого как промысловое изъятие. Действие

промысла на популяцию задается при переопределении начальных условий (1), что происходит изъятие некоторой доли запаса  $h$ , соответственно начальные условия для уравнения убыли  $N_{n+1}(0) = \lambda(1-h)N_n(T)$ . Интересно исследовать развитие состояний, приводящих к длительным нестационарным режимам в динамике моделируемой биосистемы, как например долговременное воздействие масштабной интродукции, выращенной в искусственных условиях молоди осетровых рыб. Основным аспектом в развиваемом сценарном подходе к исследованию переопределяемых вычислительных структур является понятие о ситуации и наиболее вероятных путях ее развития – трендах, предполагающих парный сравнительный анализ. Сценарий с повышением степени влияния двух основных биогенных элементов при их избытке относится к медленно проявляющимся трендам. Процесс перехода к эвтрофному состоянию иллюстрируется известным эффектом «лягушки в кипятке», когда медленное нарастание негативного фактора оказывается не очевидным для наблюдателя и не происходит своевременной реакции. Примером служит запоздалое решение о запрете коммерческого промысла осетровых видов Каспия [10]. Если межсезонное изменение гидрохимических показателей составляет единичные проценты, то их могут относить к погрешности метода и считают условия размножения постоянными, тогда как медленный негативный тренд биогенной нагрузки может вдруг резко проявить себя при сильном повышении температуры.

### Литература

1. **Переварюха, А. Ю.** Граничный кризис аттрактора в моделировании причин деградации промысловых биоресурсов // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 3. С. 4–8.
2. **Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Smith, V. H.** Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen // Ecological Applications. 1998. Vol. 8. P. 559–568.
3. **Михайлов, В. В., Марлей, В. Е., Быков, Я. И.** и др. Моделирование экосистемы озера Чао. // Экологическая химия. 2002. Т. 11, Вып. 3. С.180–195.
4. **Vinberg, G. G.** Energy flow in aquatic ecological system // Polskie Archiwum Hydrobiologii. 1970. Vol. 17. №1. P. 11–19.
5. **Hakanson, L., Boulion, V. V.** Regularities in primary production, Secchi depth and fish yield and new system to define trophic and humic state indices for lake ecosystems // Internat. Rev. Hydrobiol. 2001. Vol. 86. P. 23–62.
6. **Khodorevskaya, R. P., Kalmykov, V. A.** Formation of populations of Acipenseridae sturgeons in the Volga-Caspian basin // Journal of Ichthyology, 2014, Vol. 54, Iss. 8, P. 576–583.
7. **Veshchev, P. V., Guteneva, G. I.** Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the Lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43. № 2. P. 142–147.
8. **Ricker, W.** Stock and recruitment // Journal Fisheries research board of Canada. 1954. № 11. С. 559–623.

9. **Переварюха, А. Ю.** О методике моделирования онтогенетических изменений в жизненном цикле рыб и насекомых // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 1. С. 12–23.

10. **Ascher, W., Mirovitskaya, N.** The Caspian Sea: A Quest for Environmental Security. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 364 pp.

### References

1. **Perevaryukha, A. Y.** The boundary crisis of attractor in modeling the causes of degradation of commercial bioresources // System analysis and applied informatics, 2015, № 3, P. 4–8.

2. **Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Smith, V. H.** Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen // Ecological Applications, 1998, Vol. 8, P. 559–568.

3. **Mikhailov, V. V., Marley, V. E., Bykov, Y. I.** et al. Modeling of Chao Lake ecosystem. // Ecological chemistry. 2002. T.11, Iss. 3. P.180-195.

4. **Vinberg, G. G.** Energy flow in aquatic ecological system // Polskie Archiwum Hydrobiologii. 1970. Vol. 17. №1. P. 11–19.

5. **Hakanson, L., Boulion, V. V.** Regularities in primary production, Secchi depth and fish yield and new system to define trophic and humic state indices for lake ecosystems // Internat. Rev. Hydrobiol. 2001. Vol. 86. P. 23–62.

6. **Khodorevskaya, R. P., Kalmykov, V. A.** Formation of populations of Acipenseridae sturgeons in the Volga-Caspian basin // Journal of Ichthyology, 2014, Vol. 54, Iss. 8, P. 576–583.

7. **Veshchev, P. V., Guteneva, G. I.** Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the Lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology, 2012, Vol. 43, № 2, P. 142–147.

8. **Ricker, W.** Stock and recruitment // J. Fisheries research board of Canada, 1954, №.11, P. 559–623.

9. **Perevaryukha, A. Y.** On the technique of modeling ontogenetic changes in fish and insects lifecycle // System analysis and applied informatics, 2017, № 1, P. 12–23.

10. **Ascher, W., Mirovitskaya, N.** The Caspian Sea: A Quest for Environmental Security. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 364 pp.

Поступила  
23.04.2017

После доработки  
16.05.2017

Принята к печати  
10.06.2017

*Michailov V. V., Perevaryukha A. Yu.*

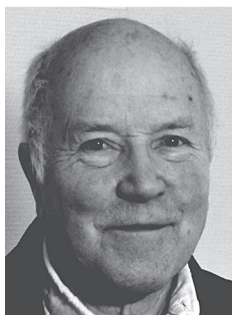
## **SIMULATION SCENARIO OF INTRODUCTION OF FISH WHITEBAIT WITH THE ACCOUNT OF BIOGENIC ELEMENTS DYNAMICS**

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS)*

*The article discusses the expansion of the previously formulated approach to modeling aspects of the reproductive cycle, taking into account the changes in the habitat and metamorphosis in the development of fish. Excessive accumulation of nutrients with prolonged use of a reservoir for artificial growth of juveniles or accelerated decomposition of organic nitrogen and phosphorus may in some cases affect the success of the reproductive process. This creates an indirect effect on long-term trends in population dynamics. In some cases, the increase in the influx of organic phosphorus further leads to a state of eutrophication and may affect the insufficient aeration of breeding sites, leading to hypoxia for hatched larvae. Even worsen the situation with the consumption of oxygen in the water at the mass destruction of eggs. Lack of organic matter leads to insufficient development of planktonic organisms for optimal growth of fishes. The system of survivability equations for calculation competing individuals of the generation is supplemented by a functional extension using an iterative model of biogenic elements dynamics, based on the analysis of processes in the ecosystem of Lake Chao. The block of the model for calculating the inflow and destruction of organic matter is synchronized with a continuous-discrete computational structure that takes into account the interrelated changes in mortality factors and the rate of development of juvenile fish during transitions between generalized ecological and physiological stages of development.*

**Keywords:** *models of populations, eutrophication, trophodynamics of aquatic environment, nutrients accumulation, reproductive efficiency, predicatively redefined structures, stages of ontogeny.*





### **Михайлов Владимир Валентинович**

В 1957 г. окончил Ленинградский электротехнический институт им. Ленина. В 1998 г. защитил в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН докторскую диссертацию по тематике «Автоматизация моделирования экологических комплексов с использованием матричных алгоритмических сетей». Профессор, в.н.с. лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН. Опубликовал более 180 научных и учебно-методических работ по тематике моделирования экологических процессов в водных экосистемах и существованию популяций в условиях Крайнего Севера.

Руководитель проекта РФФИ № 15-07-01230. E-mail: mwwcari@mail.ru

### **Michailov V. Vladimir**

In 1957 graduated from the Leningrad Electrotechnical Institute. In 1998 defended his doctoral dissertation on the topic “Automation of modeling ecological complexes using matrix algorithmic networks” at the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of RAS. Professor, Senior Researcher Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Simulation of SPIIRAS. He published over 180 scientific and educational-methodical works on modeling of ecological processes in aquatic ecosystems and the existence of populations in the Far North. Project Manager of the RFBR No. 15-07-01230.



### **Переварюха Андрей Юрьевич**

Окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления» с дипломным проектом «Справочно-информационная система анализа данных экологического мониторинга состояния Каспийского бассейна». В Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН защитил диссертацию «Анализ динамики возобновляемых биоресурсов с использованием комплекса гибридных моделей». Кандидат технических наук по специальности «Системный анализ». Старший научный сотрудник лаборатории Прикладной информатики СПИИРАН. Опубликовал 59 научных работ о моделях нелинейных явлений в биологических процессах, сценариям коллапсов промысловых запасов рыб и вспышкам численности насекомых. E-mail: madelf@pisem.net

### **Perevaryukha Yu. Andrey**

Graduated from the Astrakhan State Technical University as an engineer in “Automated Information Processing and control” with the thesis project “Reference and information of environmental monitoring data analysis system of the Caspian Sea status.” In St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS defended dissertation “Analysis of the dynamics of renewable bioresources by using a complex of a hybrid models.” Candidate of Technical Sciences in the specialty “System analysis”. Senior Researcher of Laboratory of Applied Informatics.

Published 59 scientific papers on the modeling of nonlinear phenomena in biological processes, scenarios of population dynamics of fish and insects.

Работа по проекту Российского фонда фундаментальных исследований: № 15-07-01230.