



Имитационная модель паразитарной инвазии сазана *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758) при пастбищной аквакультуре

DOI

Наумкина Д.И. – ведущий специалист Лаборатории аквакультуры Новосибирского филиала «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» («ЗапСибНИРО»), Новосибирск

@ zapsibniro@vniro.ru

Ключевые слова:

динамическая модель, программа MAEcoS, паразитарная инвазия, цестоды рода *Bothriocephalus*, пастбищное выращивание, сазан *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758), паразитизм, хищничество, смертность.

Keywords:

dynamic model, MAEcoS program, parasitic invasion, cestodes of the genus *Bothriocephalus*, pasture cultivation, carp *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758), parasitism, predation, mortality.

SIMULATION MODEL THE PARASITIC INVASION OF THE COMMON CARP *CYPRINUS CARPIO* LINNAEUS IN PASTURE AQUACULTURE

Naumkina D.I. – Novosibirsk Branch of “Research Institute of Fisheries and Oceanography”, Novosibirsk region

The article proposes to consider a dynamic model of parasitic invasion of fish of the family Cyprinidae by a parasite of the genus *Bothriocephalus*. The model is built in the MAEcoS program and based on the example of a small lake in the south of Western Siberia. The author describes studies of the parasitic infestation of common carp from one to two years old in pasture rearing during one season. The parasite is taken into account in the model by a value proportional to the number of infected fishes and is described by a function with a lagging argument. The transition of uninfected fish to infected fish, mortality and the influence of predators are taken into account. This study was conducted for the first time.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ведущих направлений исследований в России является цифровое моделирование в различных областях человеческой деятельности.

Существуют программы для моделирования биологических процессов в водной среде. Одной из таких современных программ можно по праву считать программу MAEcoS (Modelling and Analysis of Ecological Systems) [1], которая позволяет строить динамические модели и анализировать взаимодействия гидробионтов в водных экосистемах на опреде-

ленном временном промежутке при различных факторах: биотических (внутривидовая и межвидовая конкуренция, хищничество, паразитизм) и абиотических (температура водной среды, уровень водности и др.).

Программа апробирована на построении динамических моделей популяции гаммарид [1] и товарном выращивании пеляди при пастбищной аквакультуре [2; 3].

Поскольку экосистема каждого водоёма уникальна, то применять одну шаблонную модель невозможно. При по-

строении динамической модели необходимо учитывать все, значимые для модели, составляющие: различные виды рыб (аборигенные, вселенцы; рыбы-конкуренты, хищные рыбы); организмы кормовой базы: (зоопланктон, зообентос и др.); морфометрические характеристики водоемов (площадь, глубина и пр.); наличие видового состава паразитофауны, а также стадии развития исследуемого вида или популяции гидробионтов.

При построении моделей в программе MAEcoS необходимо пройти ряд этапов, в частности – написание сценария модели, построение схемы модели.

Далее представлено построение модели взаимодействия гидробионтов, на примере выращивания рыбы при пастбищной аквакультуре на типичном заморном озере юга Западной Сибири. В качестве рыбопосадочного материала взяты годовики сазана *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758) и, поскольку озеро периодически заморное, выращивание на естественных кормах предполагается в течение одного сезона до возраста 1+ (двухлетки).

Часто при расчете рыбоводно-биологического обоснования для хозяйственного использования водоёмов не учитывается фактор паразитарного воздействия на ихтиофауну. В рассматриваемой имитационной модели, в качестве негативного влияния на выращиваемую рыбу, предлагается взять паразитарную инвазию цестод рода *Bothriocephalus*, чтобы показать, что может случиться при отсутствии паразитологического мониторинга и проведения предварительных рыбоводно-мелиоративных и профилактических мероприятий в водоеме.

Целью данной работы является анализ воздействия цестод рода *Bothriocephalus* на, выращиваемого в течение одного сезона, сазана при пастбищной аквакультуре с использованием программы MAEcoS.

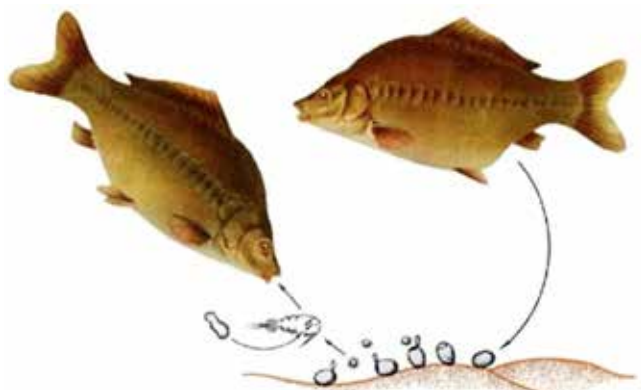


Рисунок 1. Схема инвазии цестодами рода *Bothriocephalus*

Figure 1. Scheme of invasion by cestodes of the genus *Bothriocephalus*

В статье предлагается динамическая модель паразитарной инвазии рыбы семейства *Cyprinidae* паразитом рода *Bothriocephalus*, построенная в программе MAEcoS на примере малого озера юга Западной Сибири. Автором описываются исследования паразитарной инвазии сазана при пастбищном выращивании в течение одного сезона от годовиков до двухлетков. Рассматриваемый паразит рода *Bothriocephalus* в модели учитывается величиной, пропорциональной количеству зараженной рыбы и описывается функцией с запаздывающим аргументом. При рассмотрении перехода незараженной рыбы в зараженную, учитывается смертность и влияние хищников. Данное исследование проводилось впервые.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исходным материалом для работы послужили принятые данные по количеству, посаженных в озеро, годовичков сазана, их индивидуальная масса, выживаемость за период выращивания до двухлетнего возраста, с учетом наличия местной ихтиофауны и паразитофауны малого озера юга Западной Сибири. Принятые данные основывались на обобщении практического опыта и результатов многолетних исследований пастбищного выращивания рыбы, которые проводились в Новосибирском филиале ФГБНУ «ВНИРО». Названия животных приведены в соответствии со справочником-определителем рыб Новосибирской области [4].

Определение влияния цестод на рыб производилось по данным, взятым из справочника по ихтиопатологии [5], с использованием определителя паразитов пресноводных рыб [6].

Для моделирования и анализа применялась программа MAEcoS, принципы работы которой подробно описаны в ранее опубликованной статье [1].

Данная работа проводилась впервые.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Примером для моделирования паразитической инвазии взято одно из малых озер юга Западной Сибири, имеющее среднюю глубину не более 2,0 метров.

Принято, что в озере местная ихтиофауна представлена следующими видами:

- карась серебряный *Carassius auratus gibelio* (Bloch, 1782) – конкурент в питании (зоопланктон и зообентос) и хозяин паразитов выращиваемого сазана;

- ротан *Perccottus glenii* (Dybowski, 1877), молодь которого является конкурентом в питании (зоопланктон и зообентос), а взрослые особи – хищники в первые 30 суток выращивания сазана.

Допускается, что озеро ранее зарыблялось рыбой семейства карповых, которые и занесли в водоем паразитов.

Паразитофауна карповых представлена цестодами рода *Bothriocephalus*. На рисунке 1

показан цикл развития цестод, где отмечено, что промежуточным хозяином является только планктон [6].

Половозрелые цестоды обитают в кишечнике карповых рыб, продуцируя яйца. В зависимости от температуры, через 3 суток вылупляется корацидий. Если в течение 2-3 дней его не проглотит представитель зоопланктона рода *Cyclops*, *Mesocyclops*, *Eucyclops*, *Acanthocyclops*, то личинка погибает.

За 7-10 суток внутри членистоногого развивается процеркоид. Молодь рыб семейства *Cyprinidae* заглатывает рачка и заражается. Личинка превращается в половозрелую цестоду. Полный цикл метаморфоза составляет от 45 до 60 дней, в зависимости от температуры воды. В малых озерах юга Западной Сибири вода прогревается быстрее, что способствует заражению рыбы в середине июня и цикл развития цестод сокращен, составляя не более 45 дней.

Отложившие яйца цестоды погибают. При осеннем заражении цестоды зимуют в кишечнике рыбы, весной откладывают яйца и погибают.

Инвазии цестодами приводят к ухудшению процессов пищеварения и нарушению функций органов и тканей, что является причиной задержки роста и развития, вследствие чего вес зараженных двухлеток рыб к концу вегетационного периода снижается на 25-30% [5].

Наблюдаются и такие случаи, когда зараженные сеголетки или годовики сбиваются в стайки, подплывают к берегу и погибают.

Выращиваемая рыба – годовики сазана с индивидуальной массой 25-30 г (12-15 см), количество – 120000 экз., в конце сезона достигает ожидаемой индивидуальной массы 450 г, при выживаемости 30% в условиях отсутствия паразитов и хищников [6].

Время выращивания с 10 мая по 20 сентября, при $t=133$ сут. = 1 относительных единиц (о.е.), 1 сут. = 0,00752 о.е.

Влияние температуры среды. На результат выращивания рыбы влияет значение суммы среднесуточных температур: если сумма менее 1500°C, то продуктивность водоемов снижается на 35-40%, если – 1500°C и более, то двухлетки сазана достигают массы не менее 300-450 г [7].

Типичная динамика среднесуточных температур на период выращивания рыбы представлена на рисунке 2. В рассматриваемом случае сумма составляет около 2600°C, что способствует повышению массы тела выращиваемого сазана.

Основное количество дней исследования находится в пределах от +15 до +27°C, что благоприятно сказывается не только на росте рыбопосадочного материала – годовиков сазана, но и на всех гидробионтах, включая цестод.

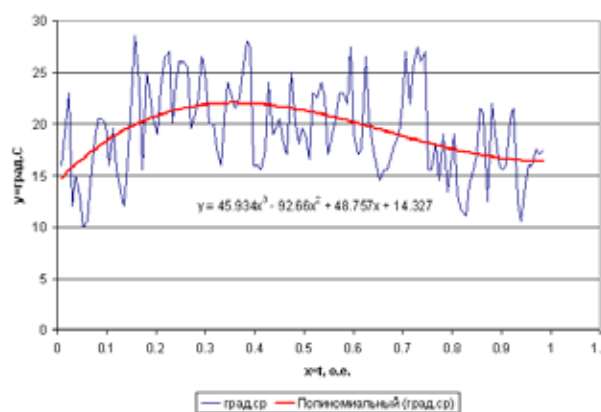


Рисунок 2. Динамика среднесуточных температур, °C

Figure 2. Dynamics of average daily temperatures, °C

Построение модели. Поскольку основной темой настоящего исследования является моделирование паразитарной инвазии сазана, то сценарий модели предельно упрощается.

Рассматриваются:

$N_1(t)$ – количество незараженных цестодами годовиков сазана,

$N_2(t)$ – количество зараженных цестодами годовиков сазана.

Время действия равно 133 сут. = 1 о.е.

Величина $N_1(t)$ со временем только убывает за счёт:

1. Перехода из незараженного в зараженное состояние. Моделирование убывания производится в виде следующего выражения:

$$-[a_1 + b \cdot N_2(t-T)] N_1, \quad (1)$$

где параметр a_1 учитывает, что заражение сазана начинается с момента помещения его в озеро и продолжается на всем рассматриваемом промежутке времени вследствие наличия зараженных от аборигенной рыбы рачков зоопланктона;

параметр b учитывает перезаражение от выделенных сазанами яиц цестод;

$N_2(t-T)$ – функция с запаздывающим аргументом, где T – время, проходящее с момента заражения до выделения яиц паразита зараженным сазаном. В общем случае учитывается, что $T = T_1, T_2, T_3$; при цикле метаморфоза 45 сут. $T_1 = 33$ сут. = 0,248 о.е.; $T_2 = (33+45)$ сут. = 78 сут. = 0,586 о.е.; $T_3 = (78+45)$ сут. = 123 сут. = 0,925 о.е.²

2. Естественной смертности. Моделирование смертности учитывается выражением:

$$-a_2 N_1 \quad (2)$$

¹ Более сложные модели аквасистем с учетом биотических и абиотических факторов рассмотрены в [2; 3].

² Поскольку $T_3 = 0,925$ о.е. близко к 1 о.е., то достаточно учитывать перезаражение сазана после времени $T_1 = 33$ сут. = 0,248 о.е. и $T_2 = (33+45)$ сут. = 78 сут. = 0,586 о.е.

3. Влияния хищника. Моделирование влияния хищника учитывается выражением:

$$-a_3 N_1 \quad (3)$$

Динамика изменения $N_2(t)$ определяется также тремя составляющими:

1. Увеличение числа зараженных сазанов равно числу перешедших из состояния незараженных в состояние зараженных:

$$+ [a_1 + b \cdot N_2(t-T)] N_1, \quad (4)$$

2. Естественной смертности, повышенной по сравнению со смертностью незараженных рыб.

Моделирование смертности учитывается выражением:

$$-a_4 N_2. \quad (5)$$

3. Влияние хищников. Учитывается влияние рыб-хищников (взрослые ротаны) на количество годовиков сазана, как незараженных, так и зараженных цестодами. Следует отметить, что хищники питаются годовиками сазаном только первые 30 суток = 0,2256 о.е.

Моделирование влияния хищника учитывается выражением:

$$-a_3 N_2. \quad (6)$$

Предполагается, что биомассы зоопланктона в среднем значении $0,8 \text{ г/м}^3$ хватает на всех рыб (сазан, серебряный карась и молодь ротана). Дефицита зообентоса, биомасса которого составляет в среднем $0,45 \text{ г/м}^2$, также нет. Такие предположения распространяются и на все другие виды пищи.

Поскольку пищи хватает всем рыбам-конкурентам (сазан, серебряный карась и ротан), то конкуренция за пищу отсутствует.

В соответствии с описанным сценарием модель паразитарной инвазии сазана представляется системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -[a_1 + bN_2(t-T)]N_1 - a_2N_1 - a_3N_1; \\ \frac{dN_2}{dt} &= +[a_1 + bN_2(t-T)]N_1 - a_4N_2 - a_3N_2 \end{aligned} \quad (7)$$

На рисунке 3 представлены графики изменения $N_1(t)$ и $N_2(t)$ для различных вариантов учёта отрицательных факторов на выход продукции.

$N_1(1)$ – количество незараженного сазана при учете естественной смертности, влияния хищника и заражения паразитом;

$N_2(1)$ – количество зараженного сазана при учете естественной смертности, влияния хищника и заражения паразитом;

$N_1(2)$ – количество незараженного сазана при учете естественной смертности и хищника (без заражения паразитом);

$N_1(3)$ – количество незараженного сазана при учете естественной смертности и заражения паразитом (без влияния хищника);

$N_2(3)$ – количество зараженного сазана при учете естественной смертности и заражения паразитом (без влияния хищника).

Представленные графики на рисунке 3 демонстрируют три сценария развития событий.

Первый сценарий. С течением времени на количество сазана действуют все отрицательные факторы: *заражение паразитом, влияние хищника и естественная смертность*. Графики показывают следующую динамику: количество незараженных сазанов $N_1(1)$ уменьшается при $t > 0,248$ о.е. (запаздывание на 33 сут.) и более резкое уменьшение происходит при $t > 0,586$ о.е. (запаздывание на 78 сут.). За счет перезаражения сазанов ко времени вылова $t = 1$ о.е.

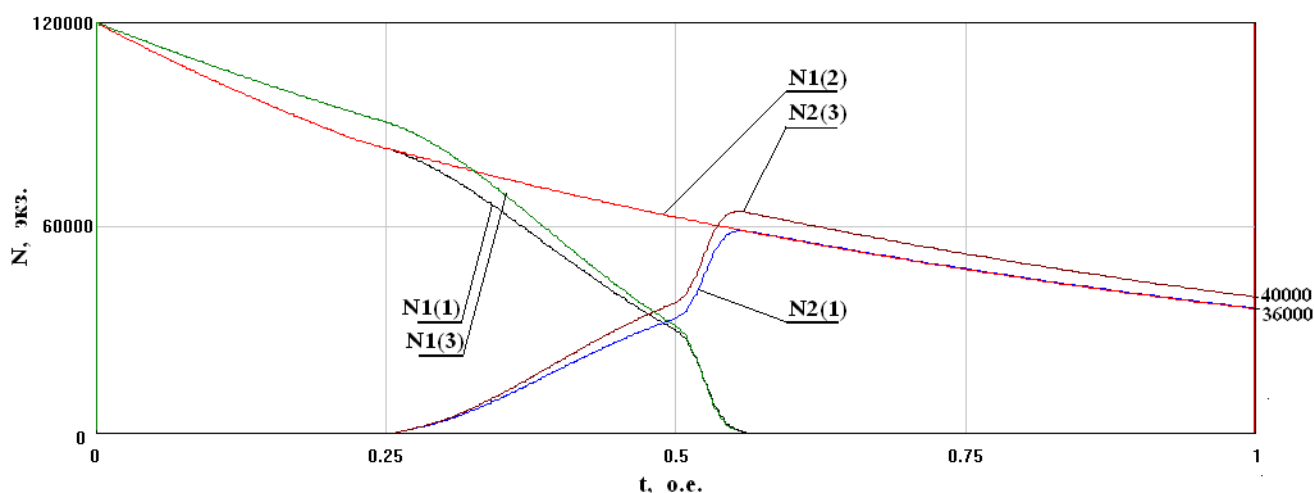


Рисунок 3. Графики изменения во времени количества рыбы

Figure 3. Graphs of changes in the number of fish over time

(133 сут.) незараженных сазанов нет, вылов возможен только зараженной рыбы $N_2(1)$. При этом масса выловленной рыбы будет равна $0,315 \times 36000 = 11\,340$ кг.

Второй сценарий. С течением времени на количество сазана действуют только два отрицательных фактора: *влияние хищника и естественная смертность*. График $N_1(2)$ показывает динамику изменения количества незараженных сазанов при отсутствии процесса заражения. При учете естественной смертности и влияния хищника, одинаковых с первым рассмотренным случаем, количество сазана на момент времени $t = 1$ о.е. равно тому же количеству рыбы, что и в первом сценарии. Отличие заключается в том, что в первом случае вся рыба заражена, а в рассматриваемом – вся рыба здоровая. При этом масса выловленной рыбы будет равна $0,450 \times 36000 = 16\,200$ кг.

Третий сценарий. С течением времени на количество сазана действуют только два отрицательных фактора: *заражение паразитом и естественная смертность*. График $N_1(3)$ расположен выше графика $N_1(1)$ до времени повторного заражения, после которого они практически сливаются. Это объясняется отсутствием влияния хищника при времени $t > 0,226$ о.е. (30 сут.). На момент времени вылова продукции количество зараженного сазана $N_2(3)$ больше, чем $N_2(1)$, что объясняется также отсутствием влияния хищника. При этом масса выловленной рыбы будет равна $0,315 \times 40000 = 12\,600$ кг.

Анализ полученных результатов показывает, что паразитарная инвазия сазана является отрицательным фактором, оказывающим наибольшее влияние на эффективность производства рыбы. Выход продукции при отсутствии паразитарной инвазии увеличивается на 43%, в то время как при ликвидации хищником – только на 11%.

Эти расчеты подтверждают важность проведения предварительной рыбохозяйственной мелиорации в водоеме и профилактики паразитарных болезней рыб.

ВЫВОДЫ

1. Программа МАЕсоS позволяет строить не только динамические модели взаимодействия составляющих водной экосистемы при пастбищной аквакультуре, но и таких сложных процессов, как паразитарная инвазия, при которых нет точных данных по массе или численности паразитов, которые попадают в организм рыбы, а также количества яиц, производимых взрослыми паразитами.

2. Предложенная в статье, имитационная модель паразитарной инвазии рыб, на примере годовиков сазана, строится по двум переменным – незараженная и зараженная рыба, при этом учитываются смертность, влияние хищника и инвазия паразитами рода *Bothriocephalus*.

3. Предложенная модель, привязанная к конкретным данным, показала, что, при отсутствии



только паразитарной инвазии выращиваемого сазана, выход продукции увеличивается на 43%, если же производится только ликвидация хищников, то увеличение продукции составляет 11%.

4. Динамическая модель наглядно показывает, что происходит в водной экосистеме озера при выращивании в водоеме товарной рыбы без применения предварительных рыбоводно-мелиоративных и профилактических мероприятий.

5. Проведенное исследование паразитарной инвазии рыбы показывает теоретическую и практическую значимость использования цифровых моделей при увеличении масштабов развития аквакультуры в РФ.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Наумкина Д.И., Наумкин Р.И. Математическое моделирование при оценках продуктивности гаммаруса в озерах Новосибирской области // Рыбное хозяйство. - 2018. - №1. - С. 67-72.
1. Naumkina D.I., Naumkin R.I. Matematicheskoe modelirovanie pri ocenках produktivnosti gammarusa v ozerah Novosibirskoy oblasti // Rybnoe hozyajstvo. - 2018. - №1. - С. 67-72.
2. Наумкина Д.И. Моделирование водных биоресурсов в аквакультуре // Рыбное хозяйство. - 2019. - №2. - С. 82-85.
2. Naumkina D.I. Modelirovanie vodnyh bioresursov v akvakul'ture // Rybnoe hozyajstvo. - 2019. - №2. - С. 82-85.
3. Наумкина Д.И., Ростовцев А.А., Абрамов А.Л. Цифровая гетерогенная динамическая модель выращивания пеляди *Coregonus peled* Gmelin // Рыбное хозяйство. - 2020. - №5. - С. 80-85. DOI 10.37663/0131-6184-2020-5-80-85
3. Naumkina D.I., Rostovtsev A.A., Abramov A.L. Cifrovaya geterogennaya model viraschivaniya pelyadi *Coregonus peled* Gmelin // Rybnoe hozyajstvo. - 2020. - №5. - С. 80-85. DOI 10.37663/0131-6184-2020-5-80-85
4. Чехлов А. Н. Справочник-определитель рыб Новосибирской области / А.Н. Чехлов. - М., 2014. - 84 с.
4. Chekhlov A. N. Spravochnik-opredelitel' ryb Novosibirskoy oblasti / A.N. Chekhlov, M., 2014. - 84 s.
5. Справочник по болезням рыб. Под ред. В.С. Осетрова. М.: "Колос", 1978. - 74 с.
5. Spravochnik po boleznyam ry'b. Pod red. V.S. Osetrova. M.: "Kolos", 1978. - 74 s.
6. Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 3. Паразитические многоклеточные. (Вторая часть). Л.: Наука. 1987. - 583 с.
6. Opredelitel' parazitov presnovodny'kh ry'b fauny' SSSR. T. 3. Paraziticheskie mnogokletochny'e. (Vtoraya chast'). L.: Nauka. 1987. - 583 s.
7. Черномашенцев А.И., Мильштейн В.В. Рыбоводство. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1983. - 272 с.
7. Chernomashenczev A.I., Mil'shteyn V.V. Ry'bovodstvo. M.: Legkaya i pishhevaya promy'shlennost'. 1983. - 272 s.