

УДК 51-76

П.Г. Сорокина

*Байкальский Государственный Университет,
Лимнологический институт СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация*

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОПУЛЯЦИИ БАЙКАЛЬСКОГО ОМУЛЯ

Аннотация. Многие современные исследования развиваются на стыке разных областей науки и техники. Отметим, что математические и компьютерные методы занимают важное место в современных эколого-биологических исследованиях, и помогают решать актуальные задачи, значительно уточняя результаты исследований. В работе приводится обзор методов и подходов к моделированию популяции байкальского омуля. Отметим, что несмотря на вводимые ограничения по сохранению численности байкальского омуля, проблема сокращения биомассы по-прежнему актуальна. За последние десять лет суммарная биомасса омуля на Байкале уменьшилась почти в три раза. Снижение запасов омуля потребовало введения очередного ограничения на промысловую деятельность в акватории Байкала. Приказом Минсельхоза России от 29 августа 2017 г. № 450 с 1 октября 2017 г. внесены изменения в правила рыболовства для Байкальского рыбохозяйственного бассейна: введен запрет на промышленный вылов байкальского омуля и определены ограничения на любительский и спортивный лов, а также на традиционное рыболовство для коренных малочисленных народов. Принятие решения по рациональному использованию биологических ресурсов возможно, когда имеется точная информация по качеству и количеству того или иного ресурса, поэтому один из ключевых вопросов рационального использования ресурсов Байкала – это достоверная оценка численности и биомассы омуля. Этой проблеме планируется посвятить дальнейшее исследование с использованием комбинации гидроакустического учета и математического моделирования. В данной работе построено уравнение зависимости силы цели от длины рыбы, которое может быть рекомендовано для расчетов биомассы байкальского омуля.

Ключевые слова. Байкальский омуль, численность популяции, гидроакустический учет, математическое моделирование, сила цели.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Эколого-экономическая оценка функционирования пресноводных биогеоценозов, фундаментальный и прикладные аспекты», № гос. регистрации АААА-А19-119070190033-0, № МИНОБРНАУКИ 0279-2019-0003.

Информация о статье. Дата поступления: 4 сентября 2020 г.

P.G. Sorokina

*Baikal State University,
Limnological Institute, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, the Russian Federation*

METHODS AND APPROACHES TO MODELING THE POPULATION OF THE BAIKAL OMUL

Abstract. Many of the recent research have an interdisciplinary nature. They use different fields of science and technology. Mathematical and computer methods

play an important role in modern ecological and biological research. These approaches help to solve urgent problems, significantly improving the results of research. The paper provides an overview of methods and approaches to modeling the population of Baikal omul. It should be noted that, despite the imposed restrictions on the protection of the Baikal omul population, the problem of reducing the biomass is still an urgent issue. Over the last ten years, the total biomass of omul has decreased almost three times. The decrease in omul stocks required the introduction of additional restriction on fishing activities in the water area of Lake Baikal. By order of the Ministry of Agriculture of Russia dated August 29, 2017 No. 450, from October 1, 2017, changes were made to the fishing rules for the Baikal fishery basin: a ban on commercial fishing of Baikal omul was introduced and restrictions on recreational and sports fishing, as well as on traditional fishing for indigenous peoples. It is possible to make a decision on the rational use of biological resources when there is accurate information on the quality and quantity of a particular resource, therefore one of the key issues of the rational use of Baikal's resources is a reliable estimate of the abundance and biomass of omul. We plan to conduct a follow-up research using a combination of hydroacoustic accounting and mathematical modeling. The current research identified an equation for the dependence of the target strength on the length of the fish, which can be recommended for calculating the biomass of the Baikal omul.

Keywords. Baikal omul, population, hydroacoustic method, mathematical modeling, target strength.

Funding. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Ecological and economic assessment of the functioning of freshwater biogeocinosis, fundamental and applied aspects», no. registration AAAA-A19-119070190033-0, number MINOBRNAUKI 0279-2019-0003.

Article info. Received 4 September, 2020.

По характеру мест обитания и размножения омуль относится к категории проходных рыб, которые основную часть жизни проводят в Байкале, а на нерест выходят в реки, впадающие в озеро. По названию мест нереста различают следующие основные популяции омуля: селенгинскую, посольскую, баргузинскую, северо-байкальскую. Омуль размножается один раз в год, нерест происходит в октябре с участием рыб возраста от 4 до 14 лет. В мае выклеваются личинки, течением они сносятся в предустьевые участки рек, где созревают до стадии малька. Дальнейшее развитие омуля происходит в Байкале. Спектр питания омуля состоит из 30-45 видов водных животных, но основными компонентами являются зоопланктон, макрогектопус и молодь рыб. Омуль возрастом до одного года потребляет только зоопланктон, особь старше двух лет имеет в годовом рационе все три компонента, омуль старше девяти лет питается исключительно молодью рыб. Взрослый омуль практически не подавляется другими обитателями оз. Байкал, но на младших стадиях развития интенсивно выедается хищниками. Поэтому можно предположить, что основное угнетающее воздействие на популяцию оказывает рыбный промысел [1–5]. Байкальский омуль считается хорошо изученным видом, оценка численности которого необходима не только для плани-

рования режима промысла и перспектив развития малого бизнеса и туризма в байкальском регионе, но и для принятия конкретных решений по режиму уровня оз. Байкал и работы гидроэлектростанций. Принятие решения по рациональному использованию биологических ресурсов возможно, когда имеется точная информация по качеству и количеству того или иного ресурса, поэтому один из ключевых вопросов рационального использования ресурсов Байкала — это достоверная оценка численности и биомассы омуля.

На сегодняшний день при исследовании популяции рыб и их динамики активно используется комбинация методов биологических наук и методов математического моделирования и симуляции. Выделим следующие взаимодополняющие подходы к изучению описанной выше проблемы:

- 1) гидроакустический учет;
- 2) математическое моделирование.

Опишем опыт применения каждого из них к учету и моделированию популяции байкальского омуля.

Гидроакустический метод нашел широкое применение в мире для оценки распределения и запасов рыб [1–6]. В процессе гидроакустической съемки исследователи собирают данные о плотности рыбных концентраций, их размерном составе, поведении объектов исследований. Запись эхосигналов сопровождается проведением тралений и биологическим анализом уловов с целью контрольного определения видового и размерно-весового состава рыб. Данный метод прочно зарекомендовал себя как объективный оперативный источник количественной информации о состоянии популяции рыб. Современный промышленный лов рыб базируется на применении гидроакустической рыбопоисковой аппаратуре, а акустические данные о динамике распределения и биомассе рыб используются при регулировании рыболовства.

Внедрение гидроакустического метода на Байкале проводилось в течение ряда лет силами разных организаций с конца 1980-х годов, адаптация и встраивание его в систему мониторинга байкальского омуля является актуальной и практически важной задачей. Такие исследования имеют большое значение для мировой науки в связи с особенностями экосистемы Байкала. Благодаря тому, что омуль в условиях Байкала пространственно и биотопически обитает отдельно от других пузырных рыб, он представляет собой оптимальный объект для проведения быстрых и эффективных количественных оценок запаса с помощью гидроакустического метода [7–15]. Однако остаётся ряд не до конца исследованных аспектов, решение которых должно способствовать повышению качества и достоверности результатов гидроакустических съемок, в том числе зависимость отражательной способности байкальского омуля от его длины.

Современный уровень исследований с применением гидроакустической техники позволяет с высокой точностью оценивать численность, а также биомассу рыб. Для этого используется уравнение зависимости силы цели (от англ. — Target Strength, *TS*), которая является энергетической характеристикой отраженного акустического сигнала отдельной рыбы, от стандартной длины особи (от англ. — Standart Length, *SL*). Одной из главных проблем здесь является выбор адекватных моделей и их параметров для конкретных данных. Значения *TS* и особенно её зависимость от частоты излучения гидроакустической аппаратуры и длины тела биообъекта устанавливают либо экспериментальным путем, либо в специальных установках, а также рассчитывают по аналитическим моделям, учитывающим форму тела, геометрию плавательного пузыря [7–15]. Точное значение *TS* для разных видов рыб — одно из основных условий успешного применения гидроакустического метода оценки характеристик рыбных ресурсов. Существующие методы определения силы цели *TS* рыбы недостаточно точны, поскольку не обеспечены надежными рабочими стандартами. Разработка их с помощью анализа уловов не приносит хороших результатов из-за селективности орудий лова, отсутствия данных о распределении длин и поведении рыб [16]. В промысловой гидроакустике зависимость *TS* рыбы от её длины *SL* обычно выражается в виде

$$TS = aLg(SL) - b,$$

где *a* и *b* — эмпирические коэффициенты.

Корректность применения стандартного коэффициента *a* = 20 является предметом современных дискуссий. В многочисленных работах, в том числе по оценке запасов байкальского омуля [12], были использованы уравнения, в которых данный коэффициент значительно отличается от стандартного значения. Приведем основные модели зависимости *TS* байкальского омуля от её длины *SL*.

Первая гидроакустическая съемка на Байкале выполнена в 1988 г. Однако до 2007 г. зависимости силы цели для байкальского омуля получено не было. Первоначально в расчетах биомассы омуля использовались либо обобщенные уравнения *TS*, либо уравнения, полученные для других видов рыб, близких к нему по морфологическим характеристикам.

Осенью 2006 г. на борту научно-исследовательского судна (НИС) «Г.Ю. Верещагин» специалистами Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) и Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН) проведены экспериментальные работы по измерению *TS* байкальского омуля в садке [14]. Из всех проведенных измерений выбрано 73 особи омуля, успешных с точки зрения акустических регистраций, в

диапазоне длин от 21 до 38 см. На основе полученных данных с использованием регрессионного анализа установлены следующие зависимости TS (дБ) от длины омуля SL (см):

– по максимальным значениям уравнение TS омуля: $TS = 20Lg(SL) - 59,74$;

– по усредненным значениям уравнение TS омуля: $TS = 20Lg(SL) - 64,24$.

В работе [12] представлены результаты гидроакустической съемки, проводимые в период с 25 мая по 5 июня 2007 г. по всей акватории Байкала впервые с использованием гидроакустического программно-технического комплекса «Аскор-2» на НИС «Г.Ю. Верещагин», позволяющий осуществлять эхозапись на частоте 200 кГц и проводить расчеты численности и биомассы по данным эхосъемки в слое воды до 350 м. В расчете TS использовано уравнение, полученное Кудрявцевым и др. [11], $TS = 28,7Lg(SL) - 76,4$.

В работе [15] сотрудниками ЛИИ СО РАН описаны результаты гидроакустической съемки, которая проводилась с 26 мая по 14 июня 2011 г. на всей акватории озера Байкал с борта судна НИС «Г.Ю. Верещагин» с использованием двухчастотного гидроакустического комплекса на базе «Furuno FCV1100» и гидроакустического программно-технического комплекса «AsCor» (ООО «Промгидроакустика»). В данном исследовании, по сравнению с выполненными в 2007 г. тралово-акустическими съемками, проведено более детальное обследование по всей акватории озера Байкал с учетом основных требования адаптации гидроакустического метода к условиям озера и экологии рыб [12]. Проведены работы по уточнению силы цели байкальского омуля для рабочей частоты эхолота 200 кГц, в результате получено соотношение

$$TS = 20Lg(SL) - 64,5.$$

В дальнейшем в работе [6] учеными ЛИИ СО РАН совместно с ООО «Промгидроакустика» продолжилось исследование по определению коэффициентов зависимости акустической отражательной способности единичного экземпляра байкальского омуля от его длины на частоте 200 кГц. Экспериментальные работы проводились в 2010 г. на озере Байкал с борта НИС «Г. Титов». Были применены двухчастотные гидроакустические комплексы с трансдюсерами типа «один луч»: основной — на базе эхолота «Furuno FCV1100» и референтный — в составе системы «AsCor» на базе эхолота «Furuno LS6000». Живых рыб помещали в садок и проводили запись индивидуальных эхо-откликов. В результате исследования получено видоспецифичное уравнение $TS = 20Lg(SL) - 63,45$, согласованное с рабочей частотой гидроакустической аппаратуры 200 кГц, которое может быть рекомендовано для расчетов биомассы байкальского омуля.

В работе [7] определены основные морфологические характеристики байкальского омуля, и установлены зависимости размеров и его пропорций от длины тела рыб. При пересчете коэффициентов с учетом аллометрических изменений длины плавательного пузыря относительно длины рыбы получено уравнение $TS = 23,3Lg(SL) - 64,4$ и проведен сравнительный анализ имеющихся до этого уравнений силы цели байкальского омуля. В результате чего авторы пришли к выводу, что уравнение, построенное на модели плавательного пузыря как вытянутого сфероида, адекватно описывает зависимость и подтверждает полученную ранее зависимость по максимальным значениям TS в условиях садкового эксперимента [6; 12] и может служить основой для дальнейших исследований.

В данной работе на основании данных силы цели TS (дБ) и промысловой длины омуля L (мм), полученных в результате гидроакустической съемки, проводимой в 2010 г. на базе эхолотов «Furuno FCV1100» и «Furuno LS6000» [6], построим уравнения зависимости этих характеристик, не фиксируя параметр a . Перед анализом данные были отсортированы во возрастаю длины рыбы (рис. 1 и рис. 2)¹.

Построим уравнения вида: $TS = aLgSL + b$. Применяя к исходным данным (рис. 1, рис. 2) методы регрессионного анализа [17], реализованные в стандартном пакете «Анализ данных» Microsoft Excel, получаем следующие наборы параметров с соответствующим коэффициентом детерминации R^2 :

¹ Пунктирами изображены графики линейных трендов для данных по силе цели.

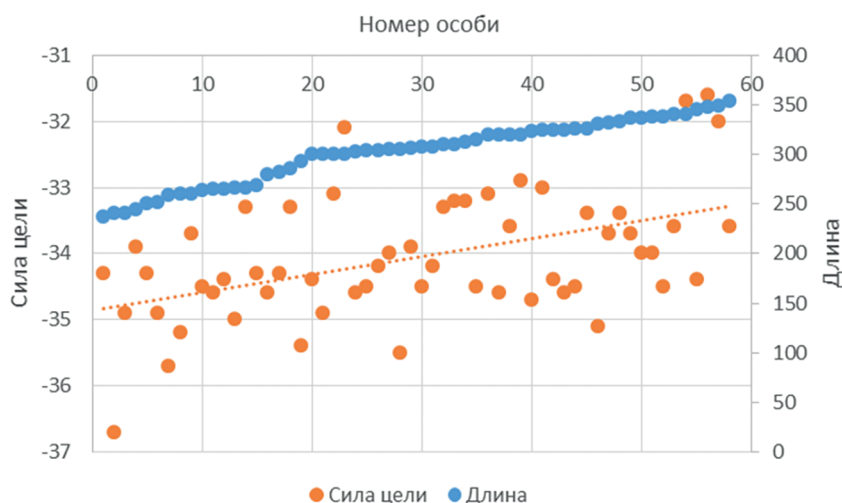


Рис. 1. Данные по эхолоту FCV 1100

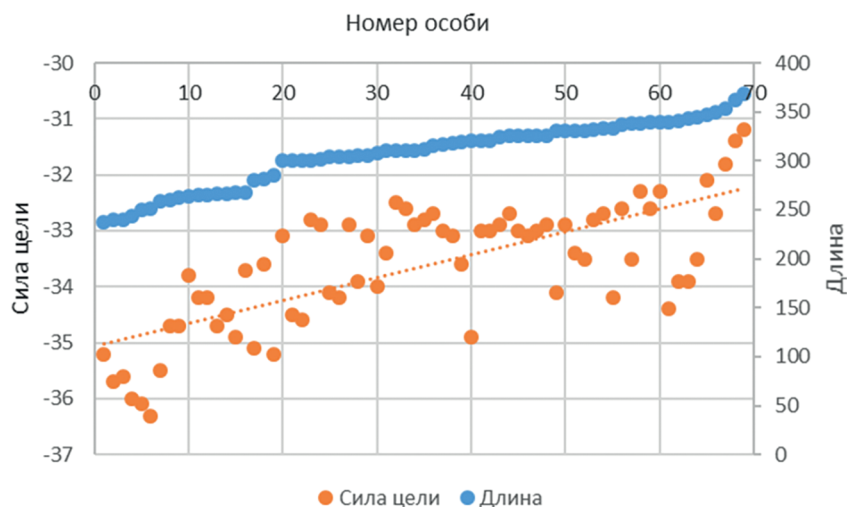


Рис. 2. Данные по эхолоту FCV LS 6000

Таблица 1

Результаты исследования

	Эхолот «FCV 1100»		Эхолот «FCV LS 6000»	
	a	b	a	b
Параметры	9,249299	-56,9738	18,39088	-79,3231
Модель регрессии	$TS = 9,249299LgSL - 56,9738$		$TS = 18,39088LgSL - 79,3231$	
Коэффициент детерминации	$R^2 = 0,21$		$R^2 = 0,63$	
Сумма квадратов отклонения	40,63628		31,3232	

Здесь сумма квадратов отклонений имеет вид $\sum_i (TS_i - aLgSL_i - b)^2$. По результатам исследования вторая модель регрессии $TS = 18,39088LgSL - 79,3231$, полученная по данным эхолота «FCV LS 6000», по значению коэффициента детерминации и суммы квадратов отклонения, дает лучший результат.

Невысокое значение статистической оценки качества регрессионной модели – коэффициента детерминации R^2 – можно объяснить большим разбросом данных TS (возможно, связанные с погрешностью измерений эхолота) (см. рис. 1 и рис. 2), что, конечно, влияет на качество модели.

Для улучшения качества представленных моделей скорректируем исходные данные с помощью применения плавающего усреднения по ряду TS с целью избежания всплесков по ним. Используя усреднение в виде

$$TS_i = \frac{TS_{i-3} + TS_{i-2} + TS_{i-1} + TS_i + TS_{i+1} + TS_{i+2} + TS_{i+3}}{7},$$

получаем следующие данные расчётов:

Таблица 2

Скорректированные результаты исследования

	Эхолот «FCV 1100»		Эхолот «FCV LS 6000»	
	a	b	a	b
Параметры	7,86869	–53,5671	16,7935	–75,3737
Модель регрессии	$TS = 7,86869LgSL - 53,5671$		$TS = 16,7935LgSL - 75,3737$	
Коэффициент детерминации	$R^2 = 0,68$		$R^2 = 0,86$	
Сумма квадратов отклонения	30,10098		5,188541	

Усреднение данных по TS значительно улучшает качество модели. Заметим, что использование усреднения с сглаживающим интервалом размера меньше семи также приводит к повышению качества модели по сравнению с исходной, однако, эти результаты уступают представленным.

С точки зрения практики интерес представляет обратная зависимость описанной выше модели, а именно $SL = 10^{\frac{TS-b}{a}}$. Применяя к исходным данным (рис. 1, рис. 2) методы регрессионного анализа, реализованные в стандартном пакете «Анализ данных» Microsoft Excel, получаем следующие наборы параметров с соответствующим коэффициентом детерминации R^2 :

Таблица 3

Результаты исследования

	Эхолот «FCV 1100»		Эхолот «FCV LS 6000»	
	a	b	a	b
Параметры	42,74064	–139,942	29,22572	–106,241
Модель регрессии	$LgSL = \frac{TS + 139,942}{42,74064}$		$LgSL = \frac{TS + 106,241}{29,22572}$	
Коэффициент детерминации	$R^2 = 0,21$		$R^2 = 0,63$	
Сумма квадратов отклонения	46 538,65303		28 303,21	

Здесь сумма квадратов отклонения имеет вид $\sum_j \left(l_i - 10^{\frac{TS_i - b}{a}} \right)^2$. При обратной зависимости наблюдается такой же эффект,

как в случае прямой зависимости: вторая модель регрессии

$$Lg SL = \frac{TS + 106,241}{29,22572}$$

дает лучший результат. Перепишем эту зависимость в исходном виде: $SL = 10^{\frac{TS+106,241}{29,22572}}$. Улучшим качество модели, применяя аналогичное усреднение:

Таблица 4

Скорректированные результаты исследования

	Эхолот «FCV 1100»		Эхолот «FCV LS 6000»	
	a	b	a	b
Параметры	11,58919	-62,7797	19,60387	-82,3601
Модель регрессии	$Lg SL = \frac{TS + 62,7797}{11,58919}$		$Lg SL = \frac{TS + 82,3601}{19,60387}$	
Коэффициент детерминации	$R^2 = 0,86$		$R^2 = 0,86$	
Сумма квадратов отклонения	14 659,6		8 142,81	

В данном эксперименте вторая модель регрессии $Lg SL = \frac{TS + 82,3601}{19,60387}$, полученная по данным эхолота «FCV LS 6000», по значению коэффициента детерминации и суммы квадратов отклонения, дает лучший результат. Запишем эту зависимость в исходном виде: $SL = 10^{\frac{TS+82,3601}{19,60387}}$.

Построенные уравнения зависимости силы цели от длины рыбы могут быть рекомендованы для расчетов биомассы байкальского омуля.

Высокая степень криминализации в сфере использования биологических ресурсов Байкала лишает науку возможности объективного определения численности омуля в озере с использованием общепринятых биостатистических методов. Недоступность популяций рыб для непосредственного наблюдения и слабый контроль за их состоянием явились причиной того, что в настоящее время нет единого мнения о последствиях, к которым приводят те или иные промысловые воздействия. В этих условиях математическое моделирование в совокупности с биостатистическими методами приобретает особую ценность как инструмент для проверки различных гипотез и определении оптимальных условий эксплуатации популяций рыб, обеспечивающих устойчивость максимальных уловов, а также для составления прогнозов о состоянии популяций и величине уловов при различных промысловых воздействиях.

Одни из первых значимых аналитических (математических) работ, посвященных междисциплинарным исследованиям экологических проблем озера Байкала, принадлежат профессору В.И. Гурману и его ученикам [18–22]. Эти исследования включали в себя разработку математических моделей эколого-экономических систем регионального уровня, выработку технологий информационного наполнения и также привлечение специалистов разных областей (экономистов, биологов, географов и т.д.). В работах [19–22] построена модель пелагического сообщества озера Байкал, основанная на схеме трофических связей озера. Авторы отмечают, что построенные модели представлены в общем варианте и в дальнейшем могут составить основу для более полных и содержательных моделей.

В работе [18] методами оптимального управления исследуется ряд задач рациональной эксплуатации рыбной популяции с искусственным, а также смешанным воспроизводством на примере посольского омуля. Исследование проводилось на укрепленных моделях и сопровождалось численными расчетами. Авторы отмечают, что приводимые результаты требуют дальнейшей проверки как на более сложных моделях, так и на уже использованных с уточненными численными значениями параметров.

Ещё одна работа, посвященная математическому моделированию популяции северобайкальского омуля, принадлежит В.В. Конторину и датируется 1980 г. издания [23]. В данной работе, используя данные с 1939 по 1946 г. и с 1962 по 1968 г., были рассчитаны коэффициенты выживания и воспроизводства. Также была рассчитана численность и биомасса популяции северобайкальского омуля в период с 1962–1968 г. Автором для дальнейшего совершенствования методики прогноза популяции омуля с применением математического моделирования было предложено отразить в модели взаимоотношение популяции с кормовыми ресурсами.

В работах [24; 25] излагается методика и результаты поэтапного моделирования функционирования экосистемы озера. Представлены три подхода к сравнительному анализу методов оценки параметров моделей по располагаемым данным наблюдений: аксиоматический подход; доказательные вычисления на базе статистических испытаний; теоретические исследования свойств и взаимосвязей решений, получаемых разными методами.

Несмотря на то, что математическое моделирование уже достаточно давно применяется для исследования динамики популяции рыб, используя качественный, современный, математический аппарат в совокупности с актуальными статистическими данными и возможностью реализации модели с помощью компьютерных программ для имитирования различных ситуаций, которые могут быть использованы для оценки текущей ситуации и построения

прогноза, на сегодняшний день подобные работы применительно к байкальскому омулю, к сожалению, отсутствуют.

В рамках данного направления планируется исследовать некоторые задачи динамической оптимизации. Приведем одну из них. Рассматривается задача отыскания такой стратегии промысла на временном интервале $[0, T]$, которая максимизирует следующий функционал прибыли от добычи:

$$J[u_2, u_3] = c_1 x_1(T) + \int_0^T [c_2 x_2(t) u_2(t) + c_3 x_3(t) u_3(t) - p_2 u_2(t) - p_3 u_3(t)] dt.$$

Здесь x_1, x_2, x_3 — численность рыб в трех возрастных группах: молоди, среднего и старшего возраста соответственно; c_1 — весовой коэффициент, определяющий необходимость сохранения популяции в рассматриваемой акватории, c_2 и c_3 — рыночные цены особей средней и старшей групп, а u_2 и u_3 характеризуют затраты на промысел в денежном эквиваленте. Кроме того, ведется промысел двух старших возрастных групп с интенсивностью u_2 и u_3 соответственно. Динамика численности особей описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_2 x_2^{\alpha_2} + A_3 x_3^{\alpha_3} - k_1 x_1, \\ \dot{x}_2 = \gamma_2 x_1 - (\lambda_2 + k_2) x_2 - u_2, \\ \dot{x}_3 = \gamma_3 x_2 - (\lambda_3 + k_3) x_3 - u_3, \end{cases}$$

где $A_i = (\sigma_i \lambda_i)^{\alpha_i}$, $i = 2, 3$, λ_2 и λ_3 — доля рыб концентрирующихся на нерестилищах; σ_2, σ_3 — индивидуальные плодовитости рыб соответствующих возрастных групп; параметры α_2, α_3 , удовлетворяют условиям $0 < \alpha_2 < 1$, $0 < \alpha_3 < 1$. Все коэффициенты есть положительные константы, имеющие следующий смысл: коэффициенты выбытия k_1 и k_2 для первой и второй группы отражают естественную смертность и переход в следующую возрастную группу, k_3 характеризует смертность старших особей; γ_2 и γ_3 — прирост численности второй и третьей группы за счет взростления особей.

Автором планируется проведение аналитического исследования для выявления возможных магистральных режимов и качественного описания оптимальных стратегий промысла, численного эксперимента с целью выработки приемлемых режимов вылова с использованием данных о популяции посольского омуля, результатам будет дана содержательная интерпретация. Кроме этого, будет предложена модификация модели, включающая дополнительные управляющие параметры, регулирующие интенсивность искусственного и естественного воспроизводства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование в исследовании комплекса детерминантов незаконного вылова водных биоресурсов (омуля) в озере Байкал / А.П. Суходолов, А.П. Федотов, П.Н. Аношко [и др.]. — DOI: 10.17150/2500-4255.2020.14(1).76-86 // Всероссийский криминологический журнал. — 2020. — Т. 14, № 1. — С. 76–86.
2. Перспективы рыбохозяйственного использования Маломорского рыбопромыслового района: экономическая оценка и обоснование / А.П. Суходолов, А.П. Федотов, М.М. Макаров [и др.]. — DOI: 10.17150/2500-2759.2020.30(2).233-244 // Известия Байкальского государственного университета. — 2020. — Т. 30, № 2. — С. 233–244.
3. Суходолов А.П. Коррупция: механизмы развития, способы профилактики (опыт компьютерного моделирования с применением численных методов) / А.П. Суходолов, И.А. Кузнецова // Вестник РУДН. Серия: Математика, информатика, физика. — 2018. — Т. 26, № 2. — С. 183–193.
4. Ишигеев В.С. Особенности личности преступника в сфере незаконной охоты и добычи водных биологических ресурсов / В.С. Ишигеев, А.Я. Бондарь // Криминологический журнал Байкальского государственного университета экономики и права. — 2013. — № 2. — С. 88–93.
5. Федотов А.П. Модель оптимизации добычи возобновляемого ресурса на примере промысла байкальского омуля / А.П. Федотов, П.Г. Сорокина, А.В. Колесникова // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2020. — Т. 2, № 1. — С. 5–14.
6. Экспериментальные исследования по измерению силы цели байкальского омуля на частоте 200 кгц / М.М. Макаров, А.И. Дегтев, И.В. Ханаев [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2018. — № 2. — С. 142–146.
7. Оценка коэффициентов уравнения акустической силы цели на основе морфологии плавательного пузыря байкальского омуля / П.Н. Аношко, М.М. Макаров, С.Б. Попов [и др.] // Юг России: экология, развитие. — 2020. — Т. 15, № 1. — С. 89–98.
8. Опыт использования гидроакустического метода и аппаратуры количественной оценки водных биомасс во внутренних водоемах / В.И. Кудрявцев, А.И. Дегтев, Э.С. Борисенко, А.Д. Мочек // Рыбное хозяйство. — 2006. — № 5. — С. 69–72.
9. Fisheries Acoustics: Theory and Practice / ed. J. Simmonds, D. MacLennan. — Oxford : Blackwell, 2005. — 234 p.
10. Кудрявцев В.И. О некоторых направлениях совершенствования технических средств и аппаратуры для повышения эффективности гидроакустических съемок / В.И. Кудрявцев // Рыбное хозяйство. — 2008. — № 2. — С. 90–93.
11. Кудрявцев В.И. Об особенностях количественной оценки запасов байкальского омуля гидроакустическим методом / В.И. Кудрявцев, А.И. Дегтев, А.В. Соколов // Рыбное хозяйство. — 2005. — № 3. — С. 66–69.
12. Гидроакустический учет ресурсов байкальского омуля / Н.Г. Мельник, Н.С. Смирнова-Залуми, В.В. Смирнов [и др.]. — Новосибирск : Наука, 2009. — 244 с.
13. Байкальский омуль. Гидроакустический учет ресурсов в 2015 г. Карта № 193 / А.И. Дегтев, М.М. Макаров, К.М. Кучер [и др.]. — URL: <http://atlas.isc.irk.ru>.
14. Измерение силы цели байкальского омуля для повышения точности оценки его запасов в озере Байкал / С.М. Гончаров, С.Б. Попов, В.М. Бондаренко [и др.] // Рыбное хозяйство. — 2008. — № 3. — С. 87–90.
15. Оценка численности и биомассы байкальского омуля тралово-акустическим методом / М.М. Макаров, А.И. Дегтев, К.М. Кучер [и др.] // Доклады академии наук. — 2012. — Т. 447, № 3. — С. 343–346.

16. Ermolchev V.A. Results of Experiments on the Video-acoustic Estimation of Fish Target Strength in Situ / V.A. Ermolchev, M.L. Zaferman // ICES Journal of Marine Science. — 2003. — Vol. 60. — P. 544–547.
17. Сорокина П.Г. Моделирование налоговой базы по налогу на имущество организаций и прогнозирование поступлений на примере Иркутской области / П.Г. Сорокина, О.В. Леонова, Л.Ю. Волченко. — DOI: 10.15826/vestnik.2018.17.2.014 // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. — 2018. — Т. 17, № 2. — С. 310–328.
18. Дыхта В.А. Модель рыбной популяции и ее эксплуатация (на примере посольского омуля) / В.А. Дыхта, И.Г. Топориков // Модели природных систем / под ред. В.И. Гурмана, И.П. Дружинина. — Новосибирск, 1978. — С. 86–94.
19. Ащепкова Л.Я. Энергетическая модель пелагического сообщества озера Байкал / Л.Я. Ащепкова, В.И. Гурман, О.М. Кожова // Модели природных систем / под ред. В.И. Гурмана, И.П. Дружинина. — Новосибирск, 1978. — С. 51–57.
20. Ащепкова Л.Я. Модель сезонной динамики пелагического сообщества / Л.Я. Ащепкова, О.М. Кожова, В.В. Меншуткин // Модели природных систем / под ред. В.И. Гурмана, И.П. Дружинина. — Новосибирск, 1978. — С. 57–65.
21. Имитационное моделирование экосистемы озера Байкал и ее антропогенных изменений / А.Б. Горстко, Ю.А. Домбровский, Н.С. Задорожная [и др.] // Модели природных систем / под ред. В.И. Гурмана, И.П. Дружинина. — Новосибирск, 1978. — С. 65–85.
22. Моделирование и управление процессами регионального развития / под ред. С.Н. Васильева. — Москва : ФИЗМАЛИТ, 2001. — 432 с.
23. Конторин В.В. Математическое моделирование популяции байкальского омуля : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.18 / В.В. Конторин. — Волгоград, 1980. — 207 с.
24. Зоркальцев В.И. Проблема выбора методов оценки параметров математической модели функционирования экосистемы озера Байкал / В.И. Зоркальцев, А.В. Казаева, И.В. Мокрый // Вестник Ангарского технического университета. — 2017. — № 11. — С. 193–199.
25. Зоркальцев В.И. Моделирование пелагического сообщества экосистемы озера Байкал / В.И. Зоркальцев, И.В. Мокрый, А.В. Казаева // Вычислительные технологии. — 2011. — Т. 16, № 1. — С. 48–66.

REFERENCES

1. Sukhodolov A.P., Fedotov A.P., Anoshko P.N., Kolesnikova A.V., Sorokina P.G., Mamonova N.V. Mathematical modeling in researching the complex determinants of illegal fishing of water bio-resources (the omul fish) in Lake Baikal. *Vserossiiskii kriminologicheskii zhurnal = Russian Journal of Criminology*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 76–86. DOI: 10.17150/2500-4255.2020.14(1).76-86. (In Russian).
2. Sukhodolov A.P., Fedotov A.P., Makarov M.M., Anoshko P.N., Sorokina P.G., Kolesnikova A.V., Zhabina D.A. Prospects of Fish-Husbandry Utilization of Maloye More Fishing Area: Economic Assessment and Substantiation. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2020, vol. 30, no. 2, pp. 233–244. DOI: 10.17150/2500-2759.2020.30(2).233-244. (In Russian).
3. Sukhodolov A.P., Kuznetsova I.A. Corruption: Development Mechanisms, Ways of Prevention (Experience of Computer Modeling with Application of Numerical Methods). *Vestnik RUDN. Seriya: Matematika, informatika, fizika = RUDN Journal of Mathematics, Information sciences and Physics*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 183–193. (In Russian).

4. Ishigeev V.S., Bondar A.Ja. Criminal Personality Aspects in Illegal Hunt and Aquatic Biological Resources Extraction. *Kriminologicheskii zhurnal Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i prava* = *Criminology Journal of Baikal National University of Economics and Law*, 2013, no. 2. pp. 88–93. (In Russian).
5. Fedotov A.P., Sorokina P.G., Kolesnikova A.V. A Model for Optimizing the Production of Renewable Resources on the Example of the Baikal Omul Fishery. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 5–14. (In Russian).
6. Makarov M.M., Degtev A.I., Khanaev I.V., Kucher K.M., Smolin I.N., Nebesnykh I.A., Anoshko P.N., Dzyuba E.V. Experimental Studies for Measuring the Target Strength of the Baikalian Omul at the Frequency of 200 KHZ. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = *International Journal on Practical and Fundamental Research*, 2018, no. 2, pp. 142–146. (In Russian).
7. Anoshko P.N., Makarov M.M., Popov S.B., Degtev A.I., Denikina N.N., Dzyuba E.V. Estimation of the Coefficients of the Equation of Acoustic Target Strength Based on the Morphology of Coregonus Migratorius (Georgi, 1775) swim Bladder. (In Russian).
8. Kudryavtsev V.L., Dyogtev A.I., Borisenko E.S., Mochek A.K. The Experience of use of Hydroacoustical Method and the Outfit for Assessment of Water Biomass at Inner Water Bodies. *Rybnoe khozyaistvo* = *Fisheries*, 2006, no. 5, pp. 69–72. (In Russian).
9. Simmonds J., MacLennan D. (eds). *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*. Oxford, Blackwell, 2005. 234 p.
10. Kudryavtsev V.I. Some Methods and Devices for Improvement of Acoustic Surveys. *Rybnoe khozyaistvo* = *Fisheries*, 2008, no. 2, pp. 90–93. (In Russian).
11. Kudryavtsev V.L., Dyogtev A.I., Sokolov A.V. About Peculiarities of Quantitative Assessment of Baikal Omul Stock by Hydroacoustic Method. *Rybnoe khozyaistvo* = *Fisheries*, 2005, no. 3, pp. 66–69. (In Russian).
12. Mel'nik N.G., Smirnova-Zalumi N.S., Smirnov V.V., Anoshko P.N., Agafonnikov V.A., Astaf'ev S.E., Bondarenko V.M. *Gidroakusticheskii uchet resursov baikal'skogo omulya* [Hydroacoustic Surveys of Baikal Omul]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 244 p.
13. Degtev A.I., Makarov M.M., Kucher K.M. *Baikal'skii omul'. Gidroakusticheskii uchet resursov v 2015 g. Karta № 193* [Baikal Omul. Hydroacoustic Surveys. Map No. 193]. Available at: <http://atlas.isc.irk.ru>. (In Russian).
14. Goncharov S.M., Popov S.B., Bondarenko V.M., Melnik N.G., Smirnova N.S., Khanaev I.V. Measurement of Target Strength of Baikal Omul (Coregonus Autumnalis Migratorius) for Increasing the Accuracy of its Stock Assessment in Lake Baikal. *Rybnoe khozyaistvo* = *Fisheries*, 2008, no. 3, pp. 87–90. (In Russian).
15. Makarov M.M., Degtev A.I., Kucher K.M., Mamontov A.M., Nebesnykh I.A., Khanaev I.V., Dzyuba E.V. Estimation of the abundance and biomass of the Baikal omul by the trawl-acoustic method. *Doklady Akademii nauk* = *Reports of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 447, no. 3, pp. 343–346. (In Russian).
16. Ermolchev V.A., Zaferman M.L. Results of Experiments on the Video-acoustic Estimation of Fish Target Strength in Situ. *ICES Journal of Marine Science*, 2003, vol. 60, pp. 544–547.
17. Sorokina P.G., Leonova O.V., Volchenko L.Yu. Modeling of the Tax Base for Property Tax and Income Forecasting for the Irkutsk Region. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie* = *Bulletin of Ural Federal University. Series: Economics and Management*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 310–328. DOI: 10.15826/vestnik.2018.17.2.014 (In Russian).
18. Dykhta V.A., Toporikov I.G. Model of the fish population and its exploitation (on the example of the posolsk subpopulation o Baikal omuls). In Gurmana V.I., Druzhinina I.P. (eds). *Modeli prirodnykh system* [Models of Natural Systems]. Novosibirsk, 1978, pp. 86–94. (In Russian).

19. Ashchepkova L.Ya., Gurman V.I., Kozhova O.M Energy model of the pelagic community of the Lake Baikal. In Gurmana V.I., Druzhinina I.P. (eds). *Modeli prirodnikh system* [Models of Natural Systems]. Novosibirsk, 1978, pp. 51–57. (In Russian).
20. Ashchepkova L.Ya., Kozhova O.M., Menshutkin V.V. Model of seasonal dynamics of the pelagic community. In Gurmana V.I., Druzhinina I.P. (eds). *Modeli prirodnikh system* [Models of Natural Systems]. Novosibirsk, 1978, pp. 57–65. (In Russian).
21. Gorstko A.B., Dombrovskii Yu.A., Zadorozhnaya N.S., Markman G.S., Matveev A.A., Mordvinkina O.G., Selyutin V.V., Epshtein L.V. Simulation modeling of the ecosystem of the Lake Baikal and its anthropogenic changes In Gurmana V.I., Druzhinina I.P. (eds). *Modeli prirodnikh system* [Models of Natural Systems]. Novosibirsk, 1978, pp. 65–85. (In Russian).
22. Vasil'ev S.N. *Modelirovanie i upravlenie protsessami regional'nogo razvitiya*. [Modeling and Management of Regional Development Processes]. Moscow, FIZMALIT Publ., 2001. 432 p.
23. Kontorin V.V. *Matematicheskoe modelirovanie populyatsii baikal'skogo omulya*. Kand. Diss. [Mathematical Modeling of the Baikal Omul Population. Cand. Diss.]. Volgograd, 1980. 207 p.
24. Zorkaltsev V.I., Kasasaeva A.V., Mokry I.V. The Problem of Choosing Methods for Estimation of Parameters of the Mathematical Model for the Functioning of Lake Baikal Ecosystem. *Vestnik Angarskogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Angarsk State Technical University*, 2017, no. 11, pp. 193–199. (In Russian).
25. Zorkaltsev V.I., Mokry I.V., Kazazaeva A.V. Modeling of the Lake Baikal Pelagic Community Ecosystem. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 48–66. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сорокина Полина Геннадьевна — старший преподаватель, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет; младший научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ermolaeva_polina@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Polina G. Sorokina — Senior Lecturer, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University; Research Assistant, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ermolaeva_polina@mail.ru.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Сорокина П.Г. Методы и подходы к моделированию популяции байкальского омуля / П.Г. Сорокина // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2020. — Т. 2, № 3. — С. 47–61.

FOR CITATION

Sorokina P.G. Methods and Approaches to Modeling the Population of the Baikal Omul. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 47–61. (In Russian).