

Моделирование морских экосистем: опыт, современные подходы, направления развития (обзор). Часть 2. Модели популяций и трофодинамики *

С. В. Бердников^{1,✉}, В. В. Селютин¹, Ф. А. Сурков², Ю. В. Тютюнов¹

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), Ростов-на-Дону, Россия

² Южный федеральный университет (ЮФУ), Ростов-на-Дону, Россия
✉ berdnikovsv@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021; принята к публикации 27.01.2022

Аннотация

Цель. В статье представлена вторая часть обзора публикаций, посвященных вопросам моделирования водных экосистем. В этой части основное внимание уделено современным подходам к управлению морскими биоресурсами, реализующим экосистемные принципы моделирования и мониторинга пространственно-временной динамики водных объектов.

Методы и результаты. Статья включает три раздела. В первом разделе рассмотрены модели прогнозирования динамики эксплуатируемых популяций и оптимизации промысла. Во втором разделе рассматриваются модели трофодинамики, применяемые для изучения структуры, продуктивности и функциональной роли морской биоты, взаимодействующей друг с другом и окружающей средой на различных трофических уровнях. Модели трофодинамики используются как для оценки влияния рыболовства на морские экосистемы, так и для анализа влияния факторов, прямо или косвенно связанных с климатической изменчивостью и антропогенной деятельностью (эвтрофирование, засоление, изменение среды обитания). Третий раздел посвящен сравнительно недавно появившемуся направлению в моделировании морских экосистем, основанному на применении географических информационных систем. Развитие геоинформационных технологий, позволяющих связывать данные как натуральных наблюдений, так и результатов модельных экспериментов с их геолокацией, оказало влияние на достижения в области экологического моделирования.

Выводы. В ближайшие годы роль математического моделирования в исследовании и управлении морскими экосистемами будет возрастать. Наиболее важными представляются такие направления исследований, как совершенствование модельного описания первичных звеньев трофической сети морских экосистем (NPZD-модели), потоков вещества и энергии в морских пищевых цепях, эвтрофирования и кислородного режима морских заливов, распространения и трансформации загрязняющих веществ и их влияния на экосистемы, функционирования морских заповедников, способов учета климатических факторов в моделях экосистем, использование данных космического мониторинга для идентификации и верификации отдельных компонентов экосистем (хлорофилл, нефтяные пятна, взвеси).

Ключевые слова: морские экосистемы, модели трофодинамики, модели промысловых популяций, информационные технологии, географические информационные системы

© Бердников С. В., Селютин В. В., Сурков Ф. А., Тютюнов Ю. В., 2022

* Часть 1 см.: Моделирование морских экосистем: опыт, современные подходы, направления развития (обзор). Часть 1. Сквозные модели / С. В. Бердников [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 1. С. 105–122. doi:10.22449/0233-7584-2022-1-105-122

Благодарности: публикация подготовлена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН на 2022 г. по темам № 122013100131-9 и № 122020100349-6.

Для цитирования: Моделирование морских экосистем: опыт, современные подходы, направления развития (обзор). Часть 2. Модели популяций и трофодинамики / С. В. Бердников [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 196–217. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-196-217

Modeling of Marine Ecosystems: Experience, Modern Approaches, Directions of Development (Review). Part 2. Population and Trophodynamic Models

S. V. Berdnikov¹, V. V. Selyutin¹, F. A. Surkov², Yu. V. Tyutyunov¹

¹ *Federal research center the Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Rostov-on-Don, Russia*

² *Southern Federal University (SFedU), Rostov-on-Don, Russia*
✉ *berdnikovsv@yandex.ru*

Abstract

Purpose. The paper presents the second part of the publications review devoted to the problems of marine ecosystem modeling. In this part, the major attention is paid to modern approaches to the management of marine biological resources which implement the ecosystem principles of modeling and monitoring the spatial-temporal dynamics of water objects.

Methods and Results. The review consists of three sections. The first one deals with the models for forecasting dynamics of the exploited populations and for optimizing fishery. The second section considers the trophodynamic models used to study the structure, productivity and functional role of marine biota interacting with other species and environment at various trophic levels. The trophodynamic models are often applied both for assessing the impact of fishery on marine ecosystems, and for analyzing the influence of the factors directly or indirectly related to climatic variability and anthropogenic activity (eutrophication, salinity, environmental changes). The third section of the review is devoted to a relatively recent direction in marine ecosystem modeling which is based on the geo-information systems. Onrush of the geo-information technologies permitting to connect the data both of the field observations and simulations with their geolocation had an impact on the achievements in the field of ecological modeling.

Conclusions. In the coming years, the role of mathematical modeling in study and management of marine ecosystems will grow. The most important areas of research seem to be as follows: perfection of model description of primary links in the marine ecosystem food webs (NPZD-models); the flows of matter and energy in the marine food chains; eutrophication and oxygen regime in the sea bays; distribution and transformations of pollutants, and their impact on ecosystems; functioning of marine reserves; the means of taking into account climatic factors in the ecosystem models; and application of space monitoring data for identifying and verifying the ecosystem individual components (chlorophyll, oil slicks, suspensions).

Keywords: marine ecosystems, trophodynamic models, fishery models, information technologies, geo-information systems

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of SSC RAS for 2022 on themes No. 122013100131-9 and No. 122020100349-6.

For citation: Berdnikov, S.V., Selyutin, V.V., Surkov, F.A. and Tyutyunov, Yu.V., 2022. Modeling of Marine Ecosystems: Experience, Modern Approaches, Directions of Development (Review). Part 2. Population and Trophodynamic Models. *Physical Oceanography*, 29(2), pp. 182-203. doi:10.22449/1573-160X-2022-2-182-203

Введение

В этой статье представлена вторая часть обзора работ, посвященных моделированию морских экосистем. В данной части обзора основное внимание уделено моделям, облегчающим изучение структуры, динамики, продуктивности и функциональной роли элементов морской биоты, взаимодействующих друг с другом и окружающей средой на различных трофических уровнях. Именно модели трофодинамики в наибольшей степени демонстрируют применение экосистемного подхода к управлению морскими биологическими ресурсами. Модели трофодинамики используются как для оценки влияния рыболовства на морские экосистемы, так и для анализа влияния факторов, прямо или косвенно связанных с климатической изменчивостью и антропогенной деятельностью (эвтрофирование, соленость, изменение среды обитания).

Стремительное развитие геоинформационных технологий, позволяющих связывать данные натурных наблюдений и результаты имитационных модельных экспериментов с их географической привязкой, не могло не оказать влияние на достижения в области моделирования морских экологических систем. Появилось направление *GIS-based models* – модели морских экосистем, основанные на разработанной для моря географической информационной системе (ГИС). Этому направлению посвящен третий раздел.

В заключении подведены итоги выполненной работы и даны обобщающие выводы о тенденциях дальнейшего развития и изменения роли математического моделирования в исследовании и управлении морскими экосистемами.

1. Модели управления морским промыслом

Задачи управления экосистемами таких сложных природных водных объектов, как море, могут преследовать разнообразные цели, связанные с решением проблем судоходства, проектирования, строительства и поддержания гидротехнических и энергетических сооружений, создания рекреационных территорий, рыболовства, рыбоборозведения, выращивания марикультур, охраны редких эндемичных видов животных и растений, предотвращения инвазии вредных вселенцев [1]. Эти задачи формулируются и решаются разными ведомствами, цели которых часто противоречат друг другу. Более того, даже в рамках одной задачи, например связанной с оптимизацией вылова определенного вида рыб, невозможно ограничиться одним единственным экономическим критерием: рост уловов может одновременно снизить их стабильность [1–3], увеличить или, наоборот, уменьшить риск коллапса эксплуатируемой популяции (см. [3–9] и работу¹) либо изменить видовой состав существующего трофического сообщества [6, 10] в результате вытеснения автохтонных

* Все модели ошибочны, но некоторые модели полезны. Д. Е. Бокс (англ.). – Авт.

¹ Тютюнов Ю. В., Сенина И. Н., Титова Л. И. Экономический и экологический критерии оптимизации промысла Азовского судака: Опыт имитационного моделирования // Компьютерное моделирование. Экология : учебное пособие / Под ред. Г. А. Угольниченко. М. : Вузовская книга, 2000. С. 58–78.

менее ценными видами-вселенцами. Например, коллапс популяции тихоокеанской сардины, произошедший в 40-х гг. XX в., был объяснен Кларком [5] совместным влиянием перелова и межвидовой конкуренции. Помимо других рыб, пищевыми конкурентами промысловых видов могут быть и представители иных таксонов. Так, после повышения солености Азовского моря до 13 ‰ в 1976–1977 гг. значительно обострилась пищевая конкуренция азовских планктофагов – тюльки и хамсы – с черноморскими медузами (корнерот и аурелия ушастая); ситуация еще более осложнилась после 1988 г. в период массовой инвазии в Азовское море гребневика *Mnemiopsis leydei* [11–14].

Управление акваценозами морей, предусматривающее воздействие либо на всю экосистему, либо на отдельную популяцию рыб, млекопитающих или членистоногих, должно базироваться на всестороннем анализе последствий принимаемых решений и учитывать многокритериальность возникающих оптимизационных задач [1]. Соответственно, разработка модельных инструментов для обоснования управления экосистемой предусматривает построение не одной (универсальной) модели, а комплекса математических моделей, с различной детальностью описывающих разные стороны и аспекты функционирования объекта управления [15].

Традиционными задачами, связанными с управлением морскими экосистемами, являются прогноз динамики и оптимизация рыбного промысла. При решении данных проблем следует иметь в виду, что нелинейности моделей динамики промысловых популяций могут порождать сложные (хаотические) режимы даже в точечных системах небольшой размерности [16–22]. Это тем более справедливо для детальных имитационных моделей, в общем виде представляющих собой систему нелинейных уравнений, при помощи которых описываются процессы преобразования во времени вектора состояния моделируемой системы в зависимости от динамически изменяющихся внешних (биотических, абиотических и антропогенных) факторов [1, 2, 7, 15, 23]. Ситуация дополнительно осложняется необходимостью учета в моделях промысла пространственной, размерной и возрастной структур [24–32], а также открытостью популяционных систем внешним, в том числе стохастическим воздействиям [1–3, 7, 33–38].

Хотя в основе теории управления промыслом лежат одновидовые популяционные модели [4, 5, 16, 39, 40], в настоящем обзоре большее внимание уделено подходам, необходимым при решении практических проблем многовидового промысла [41], использующим экосистемные принципы управления морскими ресурсами. Пример такой экосистемной модели – разработанная международной группой ученых модель *Gadget* [42, 43], предназначенная для краткосрочного прогноза эффектов различных сценариев вылова, а также для анализа исторической динамики многовидового сообщества эксплуатируемых популяций. Модель использовалась для наиболее значимых с экономической и экологической позиций видов Баренцева моря – трески, мойвы, молоди сельди и малых полосатиков Минке (малые полосатики и треска – хищники; мойва, молодь сельди и треска – жертвы) [42, 44, 45]. Модель *Gadget* основана на детальном описании биологических процессов (рост, созревание, хищничество и т. д.) и имеет возможность имитации пространственно-временной динамики экосистемы.

Еще одна модель оценки динамики численности популяций *MULTIFAN-CL* (*MFCL*) [46] разработана для комплексной оценки промысла по возрастной структуре, популяционным параметрам роста, смертности и размножения, идентифицируемым на основе временных рядов данных о вылове, промысловом усилии и длине особей. Данная модель является усовершенствованной версией ранее разработанной системы *MULTIFAN*, в основе которой лежат статистические методы анализа эмпирических временных рядов. Информация о длинах особей в системе *MFCL* рассчитывалась по данным промысловой статистики и далее применялась для моделирования возрастной динамики популяции. Модель включает в себя байесовскую оценку параметров и оценку доверительных интервалов для модельных параметров. Имитационная система, объединяющая такие структурные модули, как модель пространственной неоднородности, модель возрастной естественной смертности, модель пространственного распределения и перемещения особей, модель роста, зависящего от плотности популяции, а также модель промысла, которая учитывает сезонные колебания вылова, апробирована при изучении динамики популяции тунца в южной части Тихого океана.

Дальнейшим развитием проекта моделирования популяционной динамики тунцовых рыб является модель *SEAPODYM*, разработанная специально для изучения влияния климата на тропические виды тунцовых. Это одна из немногих моделей, способных предсказывать пространственную динамику рыбных популяций с учетом изменчивости морских экосистем [38, 47–51]. Модель рассчитывает пространственное распределение плотностей как пищевого ресурса, так и изучаемой популяции (тунцовых или других видов), структурированной по возрастным группам. Перемещения плотностей популяции обусловлены доступностью пищи и факторами внешней среды, которые также задают условия для воспроизводства. Модель учитывает изменчивость климата, используя трехмерные данные, описывающие физические и биохимические переменные океана, такие как температура, течения, концентрация растворенного в воде кислорода, обилие фитопланктона и глубина эфотического (освещенного) уровня [50–52].

Норвежская экологическая модель *NORWECOM* [53, 54] предназначена для прогнозирования численности популяции трески, обитающей в Баренцевом и Норвежском морях. В модель интегрирован модуль расчета циркуляции океанических вод *ROMS* [55–57] для имитации природных условий. Расчеты были выполнены за 25-летний период (1982–2007 гг.) для региона Северной Атлантики. Моделируемые временные ряды объема водных потоков, первичной продукции, дрейфа личинок трески с учетом температурных полей анализировались с использованием данных *VPA*-оценок 3-летней молоди трески в Баренцевом море.

Система *NORWECOM* включает в себя следующие компоненты: модель физических характеристик окружающей среды *ROMS*, описание динамики трех биогенов (азот, фосфор, кремний), первичной продукции диатомовых и жгутиковых водорослей, вторичной продукции веслоногого рачка калянус, который является одним из основных видов зоопланктона Северо-Восточной Атлантики. При моделировании выделяется два основных экосистемных фактора: климат и рыбный промысел. Для отдельных регионов моря могут также

иметь значение процессы загрязнения, инвазии видов-вселенцев и нарушения среды обитания. Однако следует отметить, что эти дополнительные процессы не оказывают большого влияния на рыбные популяции Северной Атлантики и Баренцева моря. В модели реализовано численное трехмерное моделирование циркуляции вод, гидрографии, первичной продукции и дрейфа личинок трески. Система призвана обеспечить экосистемный подход при проведении исследований моря и выработки мер управления морскими экосистемами. Расчеты позволили проанализировать влияние физики моря и нижних трофических уровней на молодь трески и ее миграции. Предсказание динамики численности молоди позволяет обосновать меры своевременного реагирования на изменения размера популяции.

В работе [58] для управления рыболовством в условиях неопределенности использован байесовский статистический метод, который в последнее время все чаще применяется в сочетании с традиционными методами оценки запасов рыбных популяций. Проблема неопределенности в регулировании промысла решается авторами статьи путем определения апостериорной вероятности потенциальных результатов каждого варианта управления. Такую вероятность можно определить, используя информацию о промысловой популяции (например, минимальный возраст особей, с которого начинается прилов, относительные показатели численности), а также предварительные распределения вероятностей популяционных параметров модели (например, параметры функции воспроизводства), основанные на данных аналогичных популяций рыб. Позднее байесовский подход был применен для верификации теоретических зависимостей запас – пополнение для популяции синеперого тунца Западной Атлантики [59].

Альтернативный подход использован в исследовании [60], посвященном оценке естественной смертности рыбы на основе различных моделей динамики численности популяций. Для параметризации моделей динамики численности 12 популяций донных рыб использовалось большое количество разнообразной информации, которая преобразовывалась в единый формат. Помимо оценки смертности, авторами рассмотрены проблемы идентификации плотностно-зависимых моделей пополнения рыбного стада типа зависимости Бивертонна – Холта [61], а также корректного учета миграций в возрастно-структурированных моделях динамики эксплуатируемых рыбных популяций [62].

В заключение раздела остановимся на отечественном, в частности собственном опыте моделирования динамики численности популяции северо-восточной атлантической трески, являющейся главным объектом промысла в Баренцевом море на протяжении многих десятков лет [63].

Рабочая группа *ICES* по арктическому рыболовству оценивает промысловый запас трески, осуществляет его прогноз и дает рекомендации по общему допустимому улову (ОДУ) с использованием модели расширенного анализа выживания *XSA*, используя данные промысловой статистики. Однако, как отмечается в работах [64, 65], применение единственного метода оценки запасов чревато тем, что допущения, используемые при расчетах в течение ряда лет, неизбежно дают ошибку, которая может нивелироваться при сравнительном анализе данных. Результаты расчетов необходимо сравнивать с прогнозами, полученными с помощью других методов. Существует несколько методик оценки запаса

трески: использующиеся в рамках *ICES* математические модели *ICA*, *AMCI*, *SMS* и др., разработанная ВНИРО модель *TISVPA* (*Triple Instantaneous Separable VPA*) [66–68], основанные на информационных технологиях ГИС-методы [65] и синоптический метод [69]. Три последние методики показали близкие оценки величины промыслового запаса, примерно в 1,6 раза превышающие результаты *XSA*-метода. По результатам сравнительного анализа данных методик специалистами ВНИРО ставится вопрос о необходимости перехода к моделям, которые более адекватно учитывают запасы трески Баренцева моря [70–72].

На основе данных о траловых уловах в августе – ноябре 1970–2013 гг. с применением статистической регрессионной модели [73] изучена многолетняя динамика структуры и локализации распределения промысловых скоплений северо-восточной арктической трески в период нагула. Авторами выявлена пространственная дифференциация скоплений в северо-западных и южных районах Баренцева моря и предложено объяснение наблюдающегося в течение нескольких лет смещения промысловых скоплений в северо-восточном направлении. Согласно гипотезе, выдвинутой в [73], смещение координат географических центров скоплений трески объясняется реакцией популяции трески на потепление в период после 1983 г. Однако, позволяя выявить связи между координатами скоплений трески и климатическими характеристиками, статистическая модель не объясняет механизма наблюдаемого явления. Для решения таких задач следует использовать модели имитационные.

Имитационная модель *ShareFish 2.0* – модель динамики численности популяции трески [74] – разработана для изучения эффективности территориальных мер охраны морской среды и рационального использования биологических ресурсов Баренцева моря. Впоследствии модель была усовершенствована путем учета пространственных особенностей (нерестовые и нагульные миграции, распределения промысловых усилий в соответствии с [75]) и применена для оценки влияния промыслового усилия на динамику запаса и вылова трески [76].

Механизмом саморегулирования численности популяции, представленной в модели девятью возрастными классами, является снижение скорости воспроизводства при увеличении запаса. Этот эффект описывается одной из двух наиболее часто используемых в моделировании рыбных популяций зависимостей Риккера или Бивертонна – Холта [4, 16]. Схема сезонного перераспределения (миграций) особей по ареалу с учетом влияния климатических флуктуаций пространственного поведения популяции реализована с использованием ГИС-ориентированного подхода и ежемесячных карт российского промысла трески в Баренцевом море за 30-летний период с 1977 по 2006 г.

Имитационные расчеты динамики численности и биомассы трески для периода 60 лет (1949–2008 гг.) позволили объяснить наблюдаемую динамику и выявить группу ключевых факторов, включающих: смену направлений нагульных миграций взрослой части популяции в зависимости от интенсивности притока атлантических вод, определяющего тепловой режим моря, зависимость воспроизводства популяции от запасов мойвы, повышение смертности молоди в аномально холодные годы и техническое совершенствование орудий лова (типов судов на промысле) начиная с 1982 г. [63, 77]. Таким образом, в моделях необходим учет влияния на жизненный цикл рыб климатических факторов и экосистемных взаимодействий.

Развиваемый в настоящее время в Баренцевом море экосистемный подход к управлению морскими биоресурсами должен способствовать в итоге сближению двух рассматриваемых подходов к оценке состояния промысловых популяций: моделей трофодинамики и моделей динамики численности популяций [63]. Их интеграция и (или) взаимный обмен данными должны способствовать выработке экологически обоснованных величин ОДУ, когда запасы промысловых популяций рассматриваются во взаимосвязи друг с другом и с другими частями экосистемы.

2. Модели трофодинамики

Разработка моделей морских экосистем, направленных на изучение структуры, динамики, продуктивности и функциональной роли морской биоты, взаимодействующей друг с другом и с окружающей средой на различных трофических уровнях, была начата по меньшей мере четыре десятилетия назад [78]. При этом многие знаковые модели появились в течение последнего десятилетия [79–81].

Наиболее широкое распространение получил подход, использованный авторами модельного комплекса *Ecopath with Ecosim (EwE)*, активно развиваемого с 1990-х гг. [82, 83]. *EwE* состоит из трех взаимосвязанных компонент: *Ecopath* – статическая структура баланса масс различных трофических уровней, *Ecosim* – динамическая имитационная модель различных компонент морской экосистемы, *Ecospace* – модуль системы, предназначенный для изучения пространственных особенностей экосистем [84].

EwE явно фокусируется на трофодинамике, как и его глобальное ответвление *EcoOcean* [85], широко используется прежде всего для изучения потенциального воздействия рыболовства на водные экосистемы и вариантов управления ими, а также для оценки воздействия изменений климата [86] и других видов человеческой деятельности [87]. *EwE*-подход был применен большой международной группой ученых для продвижения этой методологии разработки экосистемных моделей, основанных на базах данных, к 66 большим морским экосистемам (БМЭ), которые определены в настоящее время [88, 89].

За период 1984–2014 гг. опубликовано и собрано в специализированной базе данных *EcoBase* более 430 моделей, использующих *EwE*-подход [90]. *EcoBase* – это онлайн-хранилище информации о моделях *EwE*, опубликованных по всему миру в научной литературе (URL: <http://sirs.agrocampus-ouest.fr/EcoBase/>).

Можно отметить следующие тенденции и перспективы *EwE*-подхода. В целом наблюдается возрастающая со временем сложность моделей *EwE* с включением большего числа функциональных групп, но при этом значительная часть недавних разработок *EwE* была сфокусирована на некоторых видах (или таксонах), представляющих особый интерес. За три десятилетия вопросы исследований, рассматриваемые с использованием моделей *EwE*, постепенно стали более разнообразными. При этом применение моделей *EwE* для управления рыбным хозяйством с позиций экосистемного подхода росло, особенно

в период, когда разработки финансировались национальными агентствами по рыболовству.

Несмотря на разработку процедуры *Ecosim*, допускающей моделирование динамики экосистем, статический модуль *Ecopath* также (и часто) использовался для анализа изменений в экосистемах с течением времени. При этом были разработаны так называемые копии моделей *Ecopath* для разных временных периодов. Это более простой (и дополняющий) подход, чем выполнение моделирования с помощью *Ecosim* – более сложной и требующей большого количества данных процедуры.

На основе анализа лучших примеров применения *Ecopath with Ecosim* предпринимаются усилия для расширения возможностей комплекса за счет различных приемов, повышающих качество моделей [91].

Модуль *Ecospace* [92] применялся редко, примерно в 7 % проводимых с использованием *EwE* исследований, несмотря на его взаимодополняемость с *Ecosim*. Последние улучшения этого модуля [93, 94] еще не получили широкого распространения. Значительные перспективы применения *Ecospace* связаны с его интеграцией с ГИС [95].

С выпуском шестой версии программного обеспечения *EwE* пользователям был предоставлен доступ к исходному коду модели. Таким образом, предполагается, что разработчики *EwE* будут все больше склоняться к созданию своих собственных плагинов, например, с использованием языка программирования *R* [96].

Программный комплекс *EwE* все чаще используется как для оценки влияния рыболовства на морские экосистемы, так и для анализа влияния факторов, прямо или косвенно связанных с климатической изменчивостью и антропогенной деятельностью (эвтрофирование, соленость, изменение среды обитания) [87].

В России *EwE*-подход практически не применяется. Российское агентство по рыболовству не использует экосистемные подходы к управлению рыбными ресурсами морей в зоне своей ответственности. Есть примеры применения модуля *Ecopath* для экосистем Черного, Баренцева, Охотского и Берингова морей [97], а также отдельно для Баренцева [63], Охотского [98] и западной части Берингова моря [99], но эти исследования носят скорее академический характер.

Другой гибкой моделью, представляющей динамику пищевой сети, является *OSMOSE (Object-oriented Simulator of Marine ecOSystems Exploitation)* – объектно-ориентированный программный комплекс для моделирования эксплуатации морских экосистем. *OSMOSE* [100] моделирует такие показатели, как рост, смертность, питание и размножение перемещающихся по пространственной сетке «супериндивидов». В этой модели описываются трофодинамические взаимодействия между 10–20 видами (в зависимости от экосистемы), а также моделируется весь жизненный цикл рыб от икры, личинок до молоди и взрослых особей. Здесь не используется априорная пищевая сеть или матрица рациона (как в *EwE*-подходе), но при взаимодействии между видами возникают трофические отношения, что делает эту модель пригодной для рассмотрения последствий глобальных изменений для морских экосистем [101]. *OSMOSE* был применен при исследовании роли морских охраняемых районов [102] в сохранении биологических ресурсов, а также при изучении совместного

влияния изменений климата и чрезмерной эксплуатации на продуктивность и распределение рыб. Комплекс может взаимодействовать с биогеохимическими моделями [101]. Как *OSMOSE*, так и *EwE* использовались для изучения влияния инвазивных видов на распределение и обилие живых морских ресурсов [103].

В дополнение к рассмотренным подходам представим собственный опыт в области моделирования трофодинамики экосистем Азовского и Черного морей. Модель *MTBASE 1.1* (*Model Trophodynamic the Black and Azov Seas Ecosystems*)² была разработана для изучения проблемы вселения гребневика мнемнопсиса (*Mnemiopsis leydai*) в Азово-Черноморский бассейн [104]. Подход к моделированию был продиктован неполными данными по многим ключевым процессам, связанным с катастрофическими изменениями в экосистемах, повлиявшими на рыболовство в этих внутренних морях с конца 1980-х гг.

Данная модель включает две пищевые сети: 21 компонент в экосистеме Черного моря и 11 компонентов в экосистеме Азовского моря. Часть переменных, таких как хамса и мнемнопсис, являются общими для двух экосистем, поэтому присутствует обмен этими компонентами через Керченский пролив (как пассивный с течениями для планктона, так и активный – сезонные миграции – для хамсы). Модель учитывает влияние таких экзогенных факторов как температура воды, соленость в Черном море, температура воды, соленость и речной сток в Азовском море, водообмен через Керченский пролив. Первичная продукция рассматривается в качестве внешнего фактора и должна быть рассчитана с применением других подходов (моделей). В ходе моделирования рассматривались три сценария, охватывающих период 1966–1998 гг. и разделенных на три этапа. Идентификация модели проводилась на основе данных 1996–1982 гг., верификация – на основе данных 1983–1993 гг., а последний этап (1994–1998 гг.) использовался для проверки надежности модели.

Хотя модель *MTBASE 1.1* разрабатывалась независимо от *EwE*-подхода, в ней реализованы, пусть и не в общем виде, а применительно к условиям Азово-Черноморского региона, принципы *Ecopath*, *Ecosim* и *Ecospace*. Необходимо отметить следующие моменты, которые дают основания считать, что для периода конца 1990-х гг. это была инновационная разработка:

– в модель трофодинамики была встроена возрастная структура популяции хамсы от личиночных стадий до взрослых особей. Таким образом, непищевые взаимодействия, такие как нерест и возрастные переходы в явном виде были включены в модель. Этот же подход позволял более гибко учитывать изменение спектра питания по мере увеличения размера и возраста в популяции хамсы, а также воздействие промысла;

– модель позволяла исследовать роль вселения чужеродных видов в морскую экосистему, при этом факт вселения рассматривался как элемент возмущения существующей пищевой сети вследствие появления нового вида, который начинал конкурировать за пищевые ресурсы;

– модель давала возможность получить оценку влияния внешних факторов и внутренних непищевых взаимодействий на динамику экосистем Черного и Азовского морей в период 1966–1998 гг. Изменение внешних факторов (температура и соленость воды, водообмен между Азовским и Черным морями)

² URL: <https://www.fao.org/fishery/en/topic/16080/en> (дата обращения: 20.03.2022).

влияло на динамику компонентов пищевой сети через изменение среды обитания и первичной продукции органического вещества непосредственно через такое звено, как фитопланктон.

Таким образом, рассмотренные выше особенности модели позволяют отнести ее к разряду композитных (гибридных) моделей. Этот класс моделей включает более широкий набор экологических процессов (миграции, питание, размножение, использование среды обитания), основные биофизические факторы (например, температуру и соленость), более полную пищевую сеть и часто динамику питательных веществ и циклы. Это достигается объединением нескольких методов моделирования либо путем соединения разных моделей, либо путем прямой интеграции в единую унифицированную структуру [78].

Опыт разработки и применения оригинальной модели трофодинамики *MTBASE 1.1* (в развитие *FoodWeb*) к условиям экосистемы Баренцева моря [105] позволил получить некоторые оценки для величины допустимого ежегодного изъятия мойвы и трески в условиях влияния климатических факторов и экосистемных взаимодействий, хотя и для упрощенной модели пищевой сети экосистемы Баренцева моря, состоящей из таких звеньев, как фитопланктон – бактерии – простейшие – зоопланктон – мойва – треска – гренландский тюлень.

3. Современные информационные технологии и космический мониторинг

Современные информационные и телекоммуникационные технологии применительно к задачам моделирования морских экосистем открывают широкие возможности для сбора, хранения и автоматического пополнения больших массивов данных о компонентах экосистем. Огромная работа по сбору и систематизации таких данных проделана Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (*NOAA*) ([URL: www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)). В настоящее время архив данных сети Национальных центров экологической информации (*NCEI*) – подразделений *NOAA* – содержит более 35 петабайт данных, что эквивалентно примерно 400 млн картотек, заполненных документами. *NCEI* управляет огромным набором экологических данных, охватывающих большой спектр научных дисциплин. Эти данные хранятся с использованием широкого спектра методов архивирования, соглашений об именах, форматов файлов, стратегий управления, методов организации и инфраструктуры хранения. *NCEI* разрабатывает программное обеспечение, *API*, методы визуализации и другие сервисы для улучшения доступа к данным, их обнаружения и взаимодействия ([URL: https://www.ncei.noaa.gov](https://www.ncei.noaa.gov)). Ученые всего мира, занимающиеся моделированием морских экосистем, пополняют архив данных *NCEI* и пользуются накопленной там информацией. Один из соавторов настоящей статьи участвовал в пополнении архива *NCEI* данными об экосистеме Азовского моря [106, 107] и девяти морях Северного полушария [108].

В качестве инструмента, позволяющего на основе анализа экосистем обеспечить коллективный подход к управлению ресурсами в экологически ограниченных транснациональных районах, *NOAA* разработало концепцию БМЭ (англ. *Large Marine Ecosystem*, сокр. *LME*). Хотя БМЭ покрывают в основном континентальные окраины, а не глубокие океаны и океанические острова, 66 БМЭ производят около 80 % мировой годовой биомассы морского рыболовства. Из-за своей непосредственной близости к развитым береговым линиям

БМЭ находятся под угрозой загрязнения океана, чрезмерной эксплуатации и изменения среды обитания в прибрежной зоне.

Накопление и хранение данных в электронном виде имеет неоспоримые преимущества перед иными способами хранения и обработки информации. Тем не менее стоит обратить внимание на трехтомное издание «Моря мира. Экологическая оценка» [109–111]. Все главы каждой из трех книг написаны экспертами в данной области и содержат исторические обзоры мероприятий по охране и исследованию состояния окружающей среды, описание основных проблем, возникающих в результате использования природных ресурсов человеком, комментарии о тенденциях, а также рекомендации на будущее. Издание является бесценным всемирным справочным источником для студентов и исследователей, которые занимаются вопросами морской окружающей среды, рыболовства, океанографии и техники, а также развитием прибрежных зон. Редактором всех трех томов является профессор Чарльз Шеппард из Школы естественных наук при Университете Уорика, Великобритания.

Технологии ГИС, бурно развивающиеся в последнее десятилетие, оказались весьма полезными также и в моделировании морских экосистем. Основанные на ГИС модели морских экосистем (*GIS-based Marine Ecosystem Models*) имеют уже весьма обширную библиографию. Фирма *ESRI*, производитель наиболее популярной линейки программного обеспечения ГИС-технологий *ArcGIS*, выпускает буклеты, содержащие примеры применения ГИС для моделирования морских систем³. Оказалось технологически удобным встраивать в базу имеющих пространственную привязку данных ГИС-проекта приложение, осуществляющее работу математической модели экологической системы [112]. Возможности геоинформационных технологий непрерывно совершенствуются, можно создавать и использовать облачную ГИС в системе *ArcGIS Online*, стремительно приобретает популярность открытое геопространственное программное обеспечение *QGIS*⁴, составляющее уже конкуренцию лидеру рынка *ESRI* ввиду своей бесплатности.

Дистанционное зондирование в последнее десятилетие стало важным инструментом управления морской средой. В настоящее время из космоса могут быть определены несколько важных характеристик морской среды – хлорофилл *a*, соленость и температура поверхности моря. Кроме того, исследователи могут использовать спутниковые данные, чтобы помочь в картировании морских регионов, включая возможность выделения участков, занятых морскими травами, кораллами, мангровыми лесами, водно-болотными угодьями и даже мелководными бентическими средами. Спутниковые данные в настоящее время позволяют определить высоту волн и морские течения. Они используются для отслеживания биоты, начиная от рыб, китов, черепах и даже крупных птиц. Быстро развивается дистанционное зондирование разливов нефти [113, 114].

³ GIS for the Oceans [Electronic resource]. ESRI, 2011. 94 p. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/ebooks/oceans.pdf> (date of access: 20.03.2022); GIS for Ocean Conservation [Electronic resource]. ESRI, 2007. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/bestpractices/ocean-conservation.pdf> (date of access: 20.03.2022).

⁴ Marine GIS Applications (using QGIS) [Electronic resource] // EsIP Data Management Training : [site]. 2020. URL: <https://dmtclearinghouse.esipfed.org/node/9987> (date of access: 20.03.2022).

Данные дистанционного зондирования Земли с каждым годом становятся все более доступными. Одним из самых полных считается архив Геологической службы США (*USGS*), из которого можно бесплатно скачивать снимки достаточно высокого разрешения. Наибольшей популярностью пользуются снимки американского спутника *Landsat-8* и европейской программы *Sentinel-2*. Архив космических снимков океанов и морей, полученных спутниками дистанционного зондирования Земли Космического агентства США (*NASA*), накапливается также в базах данных *NOAA*. Страны Европейского союза в рамках работы Европейского космического агентства (*ESA*) создали свою Службу мониторинга морской среды «Коперникус»⁵ и в ней накапливают свой архив.

На самом высоком международном уровне поддерживается внимательное отношение к проблемам океанов планеты и БМЭ. Организация ЮНЕСКО объявила следующее десятилетие десятилетием повышенного внимания ООН к наукам об океанах для целей устойчивого развития⁶.

Заключение

Как свидетельствуют материалы данного обзора, в математическом моделировании морских экологических систем за последние 20 лет достигнут значительный прогресс.

Этому способствовали по меньшей мере три обстоятельства: во-первых, сформировавшиеся за предыдущие полвека теоретические представления о закономерностях функционирования морских экосистем и эмпирический материал; во-вторых, феноменальное развитие технологий сбора, обработки и передачи данных, географических информационных систем, космического мониторинга; в-третьих, рост внимания общества и международных организаций к проблемам рационального использования и охраны морских биологических ресурсов, к влиянию глобальных климатических изменений на моря и океаны.

Вместе с тем точность и надежность получаемых с помощью моделей результатов остаются пока недостаточными для широкого внедрения в практику и использования при принятии решений по управлению морепользованием, хотя ряд авторов высказывает умеренный оптимизм [115, 116].

Существует проблема сочетания физических и биологических моделей в рамках детализированных имитационных моделей с большим числом переменных состояния и высоким пространственным разрешением. Такого рода модели трудно идентифицировать. Кроме того, необходимо учитывать, что в морских экосистемах одновременно протекают физические, химические и биологические процессы, имеющие значительно различающиеся временные и пространственные масштабы. С вычислительной точки зрения это выражается в «жесткости» системы уравнений.

Остается нерешенной проблема параметризации моделей трофодинамики. Разные авторы используют различные виды трофических функций для сходных популяций (которые сами являются некоей абстракцией) [117], при этом численные значения используемых коэффициентов, как правило, бывают подгонены в результате ручной подгонки.

⁵ URL: <https://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 20.03.2022).

⁶ URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261962> (дата обращения: 20.03.2022).

В данном обзоре основное внимание было сконцентрировано на общих принципах и спектре современных подходов к моделированию морских систем. Рассмотрены особенности сквозного моделирования, использования индивидуально-ориентированного подхода и моделирования трофодинамики. Важным моментом является совершенствование подходов к моделированию пространственной структуры и неоднородности распределения компонентов водных экосистем. Значительный прогресс в этом направлении достигнут благодаря использованию гидрофизических и компартментальных (боксовых/камерных) моделей водообмена и переноса вещества. Прикладные аспекты использования моделей связаны, в частности, с изучением влияния чужеродных организмов (вселенцев) на структуру сообществ, с решением задач прогноза динамики и оптимизации эксплуатации промысловых рыбных популяций. В последние годы математическое моделирование морских систем развивается благодаря применению информационных технологий и космического мониторинга.

Исходя из анализа имеющихся тенденций, можно сделать вывод, что в ближайшие годы роль математического моделирования в исследовании и управлении морскими экосистемами будет возрастать.

Помимо отмеченных, наиболее важными представляются такие направления исследований, как совершенствование модельного описания первичных звеньев морских экосистем (*NPZD*-модели), являющихся основой всей трофической сети, потоков вещества и энергии в морских пищевых цепях, эвтрофирования и кислородного режима морских заливов, распространения и трансформации загрязняющих веществ и их влияния на экосистемы, функционирования морских заповедников как механизма защиты популяций от риска перелома и вымирания, способов учета климатических факторов в моделях экосистем, использование данных космического мониторинга для идентификации и верификации отдельных компонентов экосистем (хлорофилл, нефтяные пятна, взвеси).

В области методологии математического моделирования следует выделить проблемы идентификации моделей и повышения их эффективности. Применительно к моделям морских экосистем эффективность означает разумный компромисс между стремлением детализировать описание процессов, ведущим к лавинообразному увеличению числа неизвестных (калибровочных) параметров, и стремлением обеспечить возможность идентификации и верификации имитационных систем, требующим использования сравнительно простых моделей [118].

Несомненно, будет также увеличиваться количество морей и морских заливов, для которых математические модели станут своеобразными координационными центрами по аккумуляции накопленных знаний и выработке прогнозов и управлений.

Многие из рассмотренных выше направлений исследований развивались с конца 1970-х гг. в НИИ механики и прикладной математики Ростовского государственного университета по инициативе академика И. И. Воровича. В июне 2020 г. праздновалось 100-летие со дня рождения И. И. Воровича и авторы посвящают настоящий обзор его памяти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт оценки риска квазивымирания промысловых рыб на основе долгосрочного модельного прогноза популяционной динамики / Ю. В. Тютюнов [и др.] // Труды Южного научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 8. С. 181–198. doi:10.23885/1993-6621-2020-8-181-198
2. *Домбровский Ю. А., Обущенко Н. И., Тютюнов Ю. В.* Рыбные популяции в стохастической среде: модели управления и выживаемости. Ростов н/Д : Изд-во Рост. ун-та, 1991. 155 с.
3. Modelling Fluctuation and Optimal Harvesting in Perch Population / Yu. Tyutyunov [et al.] // Ecological Modelling. 1993. Vol. 69, iss. 1–2. P. 19–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90046-U](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90046-U)
4. *Beverton R. J. H., Holt S. J.* On the Dynamics of Exploited Fish Populations. London : Her Majesty's Stationery Office, 1957. 533 p. (Fishery investigations ; Series II ; Vol. 19).
5. *Clark C. W.* Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources. New York : Wiley, 1976. 352 p.
6. *Senina I., Tyutyunov Yu., Arditi R.* Extinction risk assessment and optimal harvesting of anchovy and sprat in the Azov Sea // Journal of Applied Ecology. 1999. Vol. 36, iss. 2. P. 297–306. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1999.00399.x>
7. *Abakumov A., Izrail'sky Yu.* Optimal harvest problem for fish population – structural stabilization // Mathematics. 2022. Vol. 10, iss. 6. 986. <https://doi.org/10.3390/math10060986>
8. Модели оценки риска сокращения численности промысловых популяций рыб / Ю. В. Тютюнов [и др.] // Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море. Апатиты : Кол. науч. центр РАН, 2001. Раздел 2.5. С. 380–396.
9. Risk Assessment of the Harvested Pike-Perch Population of the Azov Sea / Yu. Tyutyunov [et al.] // Ecological Modelling. 2002. Vol. 149, iss. 3. P. 297–311. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00478-1)
10. Задача оптимального управления промыслом конкурирующих рыбных популяций Азовского моря / И. И. Ворович [и др.] // Доклады АН СССР. 1989. Т. 305, № 4. С. 790–793. URL: <http://www.mathnet.ru/links/0253fd3240fa62333608ed17c0d950dc/dan7179.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).
11. Trophodynamic model of the Black and Azov Sea pelagic ecosystem: consequences of the comb jelly, *Mnemiopsis leylei*, invasion / S. V. Berdnikov [et al.] // Fisheries Research. 1999. Vol. 42, iss. 3. P. 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00049-1)
12. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г. Г. Матишов [и др.]. М. : Наука, 2006. 304 с. URL: <https://www.ssc-ras.ru/ru/page595.html/> (дата обращения: 26.02.2022).
13. *Луц Г. И.* Условия существования, особенности формирования запасов и промысел азовской тюльки. Ростов-на-Дону : ФГУП «АзНИИРХ», 2009. 118 с. URL: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1655> (дата обращения: 26.02.2022).
14. *Дроздов В. В.* Особенности многолетней динамики экосистемы Азовского моря под влиянием климатических и антропогенных факторов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. Вып. 15. С. 155–176. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/15-15.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
15. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря: Математические модели / И. И. Ворович [и др.]. М. : Наука, 1981. 359 с.
16. *Ricker W. E.* Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1954. Vol. 11, no. 5. P. 559–623. <https://doi.org/10.1139/f54-039>
17. *May R. M.* Biological populations obeying difference equations: Stable points, stable cycles, and chaos // Journal of Theoretical Biology. 1975. Vol. 51, iss. 2. P. 511–524. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(75\)90078-8](https://doi.org/10.1016/0022-5193(75)90078-8)

18. *Frisman E. Y., Neverova G. P., Revutskaya O. L.* Complex dynamics of the population with a simple age structure // *Ecological Modelling*. 2011. Vol. 222, iss. 12. P. 1943–1950. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.03.043>
19. *Горстко А. Б., Домбровский Ю. А., Сурков Ф. А.* Модели управления эколого-экономическими системами. М. : Наука, 1984. 119 с.
20. *Ильичев В. Г.* Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах. М. : Физматлит, 2009. 192 с.
21. Mathematical modeling of population dynamics based on recurrent equations: results and prospects. Part I / E. Ya. Frisman [et al.] // *Biology Bulletin*. 2021. Vol. 48, iss. 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1134/S1062359021010064>
22. *Неверова Г. П., Абакумов А. И., Фрисман Е. Я.* Режимы динамики лимитированной структурированной популяции при избирательном промысле // *Математическая биология и биоинформатика*. 2017. Т. 12, № 2. С. 327–342. doi:10.17537/2017.12.327
23. Использование математической модели экосистемы Азовского моря для исследования закономерностей функционирования и структуры системы / И. И. Ворович [и др.] // Доклады АН СССР. 1981. Т. 259, № 2. С. 302–306. URL: <http://www.mathnet.ru/links/14e3ec07e6816a672f972e5beefd4323/dan44590.pdf> (дата обращения: 26.02.2022).
24. *Beddington J. R., Taylor D. B.* 356. Note: Optimum age specific harvesting of a population // *Biometrics*. 1973. Vol. 29, no. 4. P. 801–809. <https://doi.org/10.2307/2529145>
25. *Домбровский Ю. А.* Оптимальный сбор урожая в модели популяции с перекрывающимися поколениями // *Вопросы кибернетики / Под ред. Ю. М. Свиричева*. М., 1979. Вып. 52. С. 48–59.
26. *Меншуткин В. В.* Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л. : Наука, 1971. 196 с.
27. *Getz W. M., Haight R. G.* Population harvesting: Demographic models of fish, forest, and animal resources. Princeton : Princeton University Press, 1989. 391 p. (Monographs in Population Biology ; Vol. 27).
28. *Arditi R., Dacorogna B.* Maximum sustainable yield of populations with continuous age-structure // *Mathematical Biosciences*. 1992. Vol. 110, iss. 2. P. 253–270. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(92\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(92)90040-4)
29. *Dacorogna B., Weissbaum F., Arditi R.* Maximum sustainable yield with continuous age structure and density-dependent recruitment // *Mathematical Biosciences*. 1994. Vol. 120, iss. 1. P. 99–126. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0025-5564(94)90039-6)
30. *Frisman E. Ya., Last E. V., Skaletskaya E. I.* Population dynamics of harvested species with complex age structure (for Pacific salmon fish stocks as an example) // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 198, iss. 3–4. P. 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.019>
31. *Егорова А. В., Родина Л. И.* Об оптимальной добыче возобновляемого ресурса из структурированной популяции // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2019. Т. 29, вып. 4. С. 501–517. <https://doi.org/10.20537/vm190403>
32. Основные направления и обзор современного состояния исследований динамики структурированных и взаимодействующих популяций / Е. Я. Фрисман [и др.] // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. Т. 11, № 1. С. 119–151. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-1-119-151>
33. *Абакумов А. И.* Управление и оптимизация в моделях эксплуатируемых популяций. Владивосток : Дальнаука, 1993. 129 с.
34. *Абакумов А. И., Израильский Ю. Г.* Стабилизирующая роль структуры рыбной популяции в условиях промысла при случайных воздействиях среды обитания // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2017. Т. 9, № 4. С. 609–620. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2017-9-4-609-620>

35. *Дерендяева Т. М.* Вероятностные модели в теории прогнозирования запасов промысловых рыб // Теория и практика современной науки. 2016. № 6 (12). Часть 1. С. 345–348.
36. Оправдался ли долгосрочный прогноз риска вымирания азовского судака? / Ю. В. Тютюнов [и др.] // Биофизика. 2020. Т. 65, № 2. С. 390–401. <https://doi.org/10.31857/S0006302920020234>
37. *Тютюнов Ю. В., Домбровский Ю. А., Обущенко Н. И.* Оптимальное управление эксплуатируемой популяцией при минимизации риска ее вымирания в условиях стохастичности среды обитания // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1996. Т. 3, вып. 3. С. 412–433.
38. *Сенина И. Н.* Математическое моделирование миграций рыбных популяций в приложении к оптимизации промысла и прогнозированию запасов тунцовых // Системный анализ и математическое моделирование сложных экологических и экономических систем. Теоретические основы и приложения / Отв. ред. Ф. А. Сурков, В. В. Селютин. Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального университета, 2015. Глава 3. С. 57–80.
39. *Баранов Ф. И.* Избранные труды. Т. 3 : Теория рыболовства. М. : Пищ. промышленность, 1971. 304 с.
40. *Шибяев С. В.* Формальная теория жизни рыб Ф.И. Баранова и ее значение в развитии рыбохозяйственной науки // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 127–142.
41. *Abakumov A. I., Il'in O. I., Ivanko N. S.* Game problems of harvesting in a biological community // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, iss. 4. P. 697–707. <https://doi.org/10.1134/S0005117916040135>
42. Modelling multi-species interactions in the Barents Sea ecosystem with special emphasis on minke whales and their interactions with cod, herring and capelin / U. Lindstrøm [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2009. Vol. 56, iss. 21–22. P. 2068–2079. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.11.017>
43. Dynamic of the Flemish Cap commercial stocks: use of a Gadget multispecies model to determine the relevance and synergies among predation, recruitment, and fishing / A. Pérez-Rodríguez [et al.] // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2017. Vol. 74, no. 4. P. 582–597. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0111>
44. Unquantifiable uncertainty in projecting stock response to climate change: Example from North East Arctic cod / D. Howell [et al.] // Marine Biology Research. 2013. Vol. 9, iss. 9 : thematic issue 7 : Climate Effects on the Barents Sea Marine Living Resources. P. 920–931. <https://doi.org/10.1080/17451000.2013.775452>
45. *Howell D., Filin A. A.* Modelling the likely impacts of climate-driven changes in cod-capelin overlap in the Barents Sea // ICES Journal of Marine Science. 2014. Vol. 71, iss. 1. P. 72–80. doi:10.1093/icesjms/fst172
46. *Fournier D. A., Hampton J. and Sibert J. R.* MULTIFAN-CL: a length-based, age-structured model for fisheries stock assessment, with application to South Pacific albacore, *Thunnus alalunga* // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1998. Vol. 55, no. 9. P. 2105–2116. <https://doi.org/10.1139/f98-100>
47. *Lehodey P., Senina I., Murtugudde R.* A Spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM) – Modeling of tuna and tuna-like populations // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 78, iss. 4. P. 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.06.004>
48. Modelling the impact of climate change on Pacific skipjack tuna population and fisheries / P. Lehodey [et al.] // Climatic Change. 2013. Vol. 119, iss. 1. P. 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0595-1>
49. Optimization of a micronekton model with acoustic data / P. Lehodey [et al.] // ICES Journal of Marine Science. 2015. Vol. 72, iss. 5. P. 1399–1412. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu233>
50. Integrating tagging and fisheries data into a spatial population dynamics model to improve its predictive skills / I. Senina [et al.] // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2020. Vol. 77, no. 3. P. 576–593. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0470>

51. Quantitative modelling of the spatial dynamics of South Pacific and Atlantic albacore tuna populations / I. Senina [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2020. Vol. 175. 104667. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104667>
52. *Senina I., Borderies M., Lehodey P.* A spatio-temporal model of tuna population dynamics and its sensitivity to the environmental forcing data // *Applied Discrete Mathematics and Heuristic Algorithms*. 2015. Vol. 1, no. 3. P. 5–20. URL: <https://disk.yandex.ru/i/rhmytzejGdz2nw> (дата обращения: 26.02.2022).
53. An ecosystem modeling approach to predicting cod recruitment / E. Svendsen [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2007. Vol. 54, iss. 23–26. P. 2810–2821. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.07.033>
54. Modelling ocean acidification in the Nordic and Barents seas in present and future climate / M. D. Skogen [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 131. P. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.10.005>
55. One-dimensional ecosystem model of the equatorial Pacific upwelling system. Part I: model development and silicon and nitrogen cycle / F. Chai [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. Vol. 49, iss. 13–14. P. 2713–2745. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00055-3)
56. Interdecadal variation of the transition zone chlorophyll front: A physical-biological model simulation between 1960 and 1990 / F. Chai [et al.] // *Journal of Oceanography*. 2003. Vol. 59, iss. 4. P. 461–475. <https://doi.org/10.1023/A:1025540632491>
57. PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies / O. Aumont [et al.] // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8, iss. 8. P. 2465–2513. doi:10.5194/gmd-8-2465-2015
58. *McAllister M. K., Kirkwood G. P.* Bayesian stock assessment: a review and example application using the logistic model // *ICES Journal of Marine Science*. 1998. Vol. 55, iss. 6. P. 1031–1060. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1998.0425>
59. *McAllister M. K.* Using bayes factors to evaluate the credibility of stock-recruitment relationships for western Atlantic Bluefin tuna // *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers*. 2013. Vol. 69, no. 2. P. 913–937. URL: https://iccat.int/Documents/CVSP/CV069_2013/n_2/CV069020913.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
60. Estimating natural mortality within a fisheries stock assessment model: An evaluation using simulation analysis based on twelve stock assessments / H.-H. Lee [et al.] // *Fisheries Research*. 2011. Vol. 109, iss. 1. P. 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.01.021>
61. Can steepness of the stock–recruitment relationship be estimated in fishery stock assessment models? / H.-H. Lee [et al.] // *Fisheries Research*. 2012. Vol. 125–126. P. 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.03.001>
62. Simulation of methods of dealing with age-based movement in PBF stock assessment : working paper / H.-H. Lee [et al.] // *Pacific Bluefin Tuna Working Group Intersessional Workshop : ISC 16 Report*. Kaohsiung, Chinese Taipei, 2015. Annex 4. P. 13. URL: <https://meetings.wcpfc.int/file/5091/download> (дата обращения: 26.02.2022).
63. *Лисунова Н. С., Бердников С. В.* Применение математической модели ShareFish 2.0 для анализа факторов, влияющих на запас северо-восточной арктической трески // *Изучение и освоение морских и наземных экосистем в условиях арктического и аридного климата: материалы международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 6–11 июня 2011 г. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. С. 414–417.*
64. *Булатов О. А.* К вопросу о методологии прогнозирования запасов и стратегии промысла минтая // *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 157. С. 45–70. URL: http://vniro.ru/files/trydi_vniro/archive/tv_2015_t_157_article_4.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
65. Современное состояние запасов трески Баренцева моря и прогноз ОДУ на 2008 г. / О. А. Булатов [и др.] // *Рыбное хозяйство*. 2007. № 5. С. 61–65. URL: <http://dspace.vniro.ru/bitstream/handle/123456789/4806/17.Булатов.pdf?sequence=19> (дата обращения: 26.02.2022).

66. Васильев Д. А., Булгакова Т. И. Альтернативная оценка запаса баренцевоморской трески с использованием модели TISVPA // Рыбное хозяйство. 2007. № 5. С. 54–60.
67. Васильев Д. А., Булатов О. А. Оценка запасов северо-восточных арктической трески и пикши с помощью модели TISVPA // Вопросы рыболовства. 2015. Т. 16, № 4. С. 497–505. URL: http://www.vniro.ru/files/voprosy_rybolovstva/archive/vr_2015_t16_4_article_11.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
68. Булгакова Т. И. Сценарное моделирование, направленное на тестирование правила регулирования промысла северо-восточной арктической трески // Рыбное хозяйство. 2009. № 4. С. 77–80.
69. Борисов В. М., Котенев Б. Н., Борисов А. И. Российские переловы баренцевоморской трески в море и в норвежских отчетах // Рыбное хозяйство. 2006. № 5. С. 6–9.
70. Жичкин А. П. Пространственно-временная изменчивость промысловой значимости различных районов рыбного лова в Баренцевом море // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 3. С. 465–473. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v17_3_n58/465_473_zhich.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
71. Оценка запасов трески Баренцева моря / Б. Н. Котенев [и др.] // Рыбное хозяйство. 2007. № 5. С. 51–53.
72. Шунтов В. П., Темных О. С. Иллюзии и реалии экосистемного подхода к изучению и управлению морскими и океаническими биологическими ресурсами // Известия ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 3–29.
73. Эффекты современных изменений климата в распределении промысловых скоплений северо-восточной арктической трески в период нагула / В. А. Боровков [и др.] // Вопросы промысловой океанологии. 2014. Вып. 11. С. 61–75.
74. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Селютин В. В. Морские охраняемые территории как метод защиты эксплуатируемых популяций (на примере лофотено-баренцевоморской трески *Gadus morhua morhua*) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2002. № 4. С. 68–73.
75. Жичкин А. П. Атлас российского промысла трески в Баренцевом море (1977–2006 гг.). Мурманск : Радица, 2009. 212 с.
76. Проектирование территориальных мер охраны морской среды с использованием математических моделей и правовые аспекты управления (на примере лофотено-баренцевоморской трески *Gadus morhua morhua* L.) / С. В. Бердников [и др.] // Рыбное хозяйство. 2010. № 6. С. 58–66.
77. Интегрированная математическая модель большой морской экосистемы Баренцева и Белого морей – инструмент для оценки природных рисков и эффективного использования биологических ресурсов / С. В. Бердников [и др.] // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487, № 5. С. 566–572. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524875566-572>
78. A protocol for the intercomparison of marine fishery and ecosystem models: Fish-MIP v1.0 / D. P. Tittensor [et al.] // Geoscientific Model Development. 2018. Vol. 11, iss. 4. P. 1421–1442. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1421-2018>
79. Fulton E. A., Link J. S. Modeling approaches for marine ecosystem-based management // Marine Ecosystem-Based Management / M. J. Fogarty, J. J. McCarthy (Eds.). Harvard : Harvard University Press, 2014. 568 p. (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas ; Vol. 16).
80. Projecting changes in the distribution and productivity of living marine resources: A critical review of the suite of modelling approaches used in the large European project VECTORS / M. A. Peck [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2018. Vol. 201. P. 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.05.019>
81. Integrated ecological-economic fisheries models – Evaluation, review and challenges for implementation / J. R. Nielsen [et al.] // Fish and Fisheries. 2018. Vol. 19, iss. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1111/faf.12232>

82. *Christensen V., Walters C. J.* Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations // *Ecological Modelling*. 2004. Vol. 172, iss. 2–4. P. 109–139. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.09.003>
83. *Polovina J. J.* Model of a coral reef ecosystem. 1. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals // *Coral Reefs*. 1984. Vol. 3, iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/BF00306135>
84. *Pauly D., Christensen V., Walters C.* Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries // *ICES Journal of Marine Science*. 2000. Vol. 57, iss. 3. P. 697–706. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0726>
85. The global ocean is an ecosystem: simulating marine life and fisheries / V. Christensen [et al.] // *Global Ecology and Biogeography*. 2015. Vol. 24, iss. 5. P. 507–517. <https://doi.org/10.1111/geb.12281>
86. Combined effects of global climate change and regional ecosystem drivers on an exploited marine food web / S. Niiranen [et al.] // *Global Change Biology*. 2013. Vol. 19, iss. 11. P. 3327–3342. <https://doi.org/10.1111/gcb.12309>
87. Using the Ecopath with Ecosim modeling approach to understand the effects of watershed-based management actions in coastal ecosystems / J. M. Vasslides [et al.] // *Coastal Management*. 2017. Vol. 45, iss. 1. P. 44–55. <http://dx.doi.org/10.1080/08920753.2017.1237241>
88. Database-driven models of the world's Large Marine Ecosystems / V. Christensen [et al.] // *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220, iss. 17. P. 1984–1996. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.041>
89. Representing variable habitat quality in a spatial food web model / V. Christensen [et al.] // *Ecosystems*. 2014. Vol. 17, iss. 8. P. 1397–1412. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9803-3>
90. Global overview of the applications of the Ecopath with Ecosim modeling approach using the EcoBase models repository / M. Colleter [et al.] // *Ecological Modelling*. 2015. Vol. 302. P. 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.025>
91. Best practice in Ecopath with Ecosim food-web models for ecosystem-based management / J. J. Heymans [et al.] // *Ecological Modelling*. 2016. Vol. 331. P. 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.12.007>
92. *Walters C., Pauly D., Christensen V.* Ecospace: prediction of mesoscale spatial patterns in trophic relationships of exploited ecosystems, with emphasis on the impacts of Marine Protected Areas // *Ecosystems*. 1999. Vol. 2, iss. 6. P. 539–554. <https://doi.org/10.1007/s100219900101>
93. Representation of multistanza life histories in Ecospace models for spatial organization of ecosystem trophic interaction patterns / C. Walters [et al.] // *Bulletin of Marine Science*. 2010. Vol. 86, no. 2. P. 439–459. URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/umrsmas/bullmar/2010/00000086/00000002/art00017> (дата обращения: 26.02.2022).
94. Using the Ecopath with Ecosim modeling approach to understand the effects of watershed-based management actions in coastal ecosystems / J. M. Vasslides [et al.] // *Coastal Management*. 2017. Vol. 45, iss. 1. P. 44–55. <https://doi.org/10.1080/08920753.2017.1237241>
95. Bridging the gap between ecosystem modeling tools and geographic information systems: Driving a food web model with external spatial–temporal data / J. Steenbeek [et al.] // *Ecological Modelling*. 2013. Vol. 263. P. 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.027>
96. Whitehouse G. A., Aydin K. Y. Assessing the sensitivity of three Alaska marine food webs to perturbations: an example of Ecosim simulations using Rpath // *Ecological Modelling*. 2020. Vol. 429. 109074. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109074>
97. *Бердников С. В., Сорокина В. В.* Результаты применения EwE подхода для оценки допустимого промыслового воздействия на популяции рыб Баренцева, Охотского, Берингова, Каспийского и Черного морей // *Экология. Экономика. Информатика*. XL конференция «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования»: материалы конференции. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. С. 35–39.

98. Радченко В. И. Характеристика экосистемы Охотского моря по результатам моделирования // Труды ВНИРО. 2015. Т. 155. С. 79–111. URL: http://vniro.ru/files/trydi_vniro/archive/tv_2015_t_155_article_7.pdf (дата обращения: 26.02.2022).
99. Заволокин А. В., Радченко В. И., Кулик В. В. Динамика трофической структуры эпипелагического сообщества западной части Берингова моря // Труды ТИНРО. 2014. Т. 179. С. 204–219. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014-179-204-219>
100. Shin Y.-J., Cury P. Exploring fish community dynamics through size-dependent trophic interactions using a spatialized individual-based model // Aquatic Living Resources. 2001. Vol. 14, iss. 2. P. 65–80. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01106-8](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01106-8)
101. Two-way coupling versus one-way forcing of plankton and fish models to predict ecosystem changes in the Benguela / M. Travers [et al.] // Ecological Modelling. 2009. Vol. 220, iss. 21. P. 3089–3099. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.08.016>
102. Yemane D., Shin Y.-J., Field J. Exploring the effect of marine protected areas on the dynamics of fish communities in the southern Benguela: an Individual-based modelling approach // ICES Journal of Marine Science. 2009. Vol. 66, iss. 2. P. 378–387. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn171>
103. Making modelling count – increasing the contribution of shelf-seas community and ecosystem models to policy development and management / K. Hyder [et al.] // Marine Policy. 2015. Vol. 61. P. 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.07.015>
104. Trophodynamic model of the Black and Azov Sea pelagic ecosystem: consequences of the comb jelly, *Mnemiopsis leylei*, invasion / S. V. Berdnikov [et al.] // Fisheries Research. 1999. Vol. 42, iss. 3. P. 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00049-1)
105. Дашкевич Л. В., Бердников С. В., Голубев В. А. Применение модели трофодинамики Баренцева моря для анализа динамики промысловых популяций и оценки допустимых нагрузок на экосистему // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. Апатиты : КНЦ РАН, 2007. Вып. 2. Глава 3. С. 64–103.
106. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006 / G. Matishov, S. Levitus (eds.). Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 103 p. (NOAA Atlas NESDIS 59). 1 electronic optical disc (CD-ROM).
107. Levitus S. Climatic atlas of the Sea of Azov 2008 : Dataset. NOAA National Centers for Environmental Information, 2013. 1 disc set. (NODC Standard Product: International ocean atlas ; Volume 11). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/0098574> (date of access: 26.02.2022).
108. Atlas of climatic changes in nine large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013) / G. G. Matishov [et al.] ; G. G. Matishov, K. Sherman, S. Levitus (Eds.). 2014. 131 p. (NOAA Atlas NESDIS 78). doi:10.7289/V5Q52MK5
109. World Seas: an Environmental Evaluation. Volume I : Europe, The Americas and West Africa / Ch. Sheppard (Ed.). 2nd Edition. Academic Press, 2019. 912 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04330-1>
110. World Seas: an Environmental Evaluation. Volume II : the Indian Ocean to the Pacific / Ch. Sheppard (Ed.). 2nd Edition. Academic Press, 2019. 932 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04332-5>
111. World Seas: an Environmental Evaluation. Volume III : Ecological Issues and Environmental Impacts / Ch. Sheppard (Ed.). 2nd Edition Academic Press, 2019. 666 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04336-2>
112. The power of geographic information systems (GIS) for oceanography: Implications for spatio-temporal modelling of mid-ocean ridge evolution : conference paper / D. J. Wright [et al.] // Proceedings of The Oceanography Society Pacific Basin Meeting. Honolulu, Hawaii, 1994. P. 66.
113. Ouellette W., Getinet W. Remote sensing for Marine Spatial Planning and Integrated Coastal Areas Management: Achievements, challenges, opportunities and future prospects // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2016. Vol. 4. P. 138–157. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.003>

114. *Fingas M.* Remote sensing for marine management // *World Seas: an Environmental Evaluation. Volume III : Ecological Issues and Environmental Impacts.* / Ch. Sheppard (Ed.). 2nd Edition Academic Press, 2019. Chapter 5. P. 103–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00005-X>
115. *Anderson T. R.* Progress in marine ecosystem modelling and the “unreasonable effectiveness of mathematics” // *Journal of Marine Systems.* 2010. Vol. 81, iss. 1–2. P. 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.12.015>
116. *Robson B. J.* When do aquatic systems models provide useful predictions, what is changing, and what is next? // *Environmental Modelling & Software.* 2014. Vol. 61. P. 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.009>
117. *Тютюнов Ю. В., Тумова Л. И.* От Лотки–Вольтерра к Ардити–Гинзбургу: 90 лет эволюции трофических функций // *Журнал общей биологии.* 2018. Т. 79, № 6. С. 428–448. doi:10.1134/S004445961806009X
118. *Prieß M., Koziel S., Slawig T.* Marine ecosystem model calibration with real data using enhanced surrogate-based optimization // *Journal of Computational Science.* 2013. Vol. 4, iss. 5. P. 423–437. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2013.04.001>

Об авторах:

Бердников Сергей Владимирович, директор, Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3095-5532**, **Scopus Author ID: 6601964465**, **ResearcherID: AAR-9246-2020**, <https://publons.com/researcher/3732484/sergey-berdnikov/>, berdnikovsv@yandex.ru

Селютин Виктор Владимирович, ведущий научный сотрудник, Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2209-1009**, **Scopus Author ID: 6506339274**, **WoS ResearcherID: ABD-5405-2021**, **РИИЦ AuthorID: 71104**, **SPIN-код: 4020-7379**, vvs1812@gmail.com

Сурков Федор Алексеевич, заведующий кафедрой глобальных информационных систем, Южный федеральный университет (Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-6530-3198**, **Scopus Author ID: 6506066619**, fasurkov@sfedu.ru

Тютюнов Юрий Викторович, главный научный сотрудник, Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9994-843X**, **Scopus Author ID: 6602967725**, **ResearcherID: A-4012-2013**, <https://publons.com/researcher/1705497/yuri-tyutyunov/>, yuri.tyutyunov@yandex.ru