

УДК 502.65 + 502.656

© Т. Р. Минина^{1*}, В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов^{2,3}, 2024

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем региональной экономики Российской академии наук, 190013, Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, 38

² Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 185030, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50

³Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

*trminina@yandex.ru

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ В ЛИМНОЛОГИИ, ОКЕАНОЛОГИИ, ЭКОЛОГИИ И ЭКОНОМИКЕ В РАБОТАХ В.В. МЕНШУТКИНА

Статья поступила в редакцию 05.02.2024, после доработки 13.05.2024, принята в печать 15.05.2024

Аннотация

Приведен краткий обзор работ доктора биологических наук, профессора В.В. Меншуткина за 65-летний период научной деятельности, начавшейся в 1960-е гг. с экспериментальных работ по гидрофизике озера Байкал и первых математических моделей популяции окуня маленького озера Херя-Ярви (Карельский перешеек) и сообщества рыб в озере Дальнем (Камчатка). Последняя имела большое практическое значение при заключении соглашения с Японией о квотах вылова нерки.

Круг интересов В.В. Меншуткина был весьма широк и включал математическое моделирование в биологии, физиологии, лимнологии, океанологии, демографии, экономике, экологии и рациональном природопользовании. К работам по исследованию водных объектов и процессов в них относится моделирование динамики популяций рыб и водных беспозвоночных, антарктического криля. Созданы математические модели экосистем Ладожского и Онежского озер, а за время океанских экспедиций Академии наук — Японского моря и района Перуанского апвеллинга.

Интересны его исследования в области физиологии кровообращения и водно-солевого обмена, работы, связанные с космической тематикой, с моделированием диагностики и лечения психических заболеваний. Особое внимание В.В. Меншуткин уделял вопросам биологической эволюции и моделированию эволюционного процесса. Математический аппарат, используемый В.В. Меншуткиным, очень широк: от систем дифференциальных уравнений до конечных автоматов, нейронных сетей, нечеткой логики и когнитивного моделирования (нового направления в искусственном интеллекте), с которым были связаны исследования эколого-социо-экономических систем водосборов водных объектов.

О.П. Савчука и В.В. Меншуткина объединяли методы исследования — математическое моделирование и изучаемые объекты: океаны, моря и озера. Есть у них и единственная совместная публикация — коллективная монография по результатам работы над проектом «Невская губа», на основании выводов которого было принято столь важное для Петербурга решение о завершении строительства защитных сооружений от наводнений.

Ключевые слова: математическое моделирование, лимнология, океанология, экономика, экосистема, эволюция, эколого-социо-экономическая система (ЭСЭ-система), когнитивное моделирование, искусственный интеллект

UDC 502.65 + 502.656

© Т. Р. Минина^{1*}, В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов^{2,3}, 2024

¹Institute for Regional Economic Studies Russian Academy of Science, 38 Serpukhovskaya Str., St. Petersburg, 190013, Russia

²Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 50 A. Nevskogo Pr., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030, Russia

³Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

*trminina@yandex.ru

Ссылка для цитирования: Минина Т.Р., Меншуткин В.В., Филатов Н.Н. О математическом моделировании в лимнологии, океанологии, экологии и экономике в работах В.В. Меншуткина // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 119–133. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-10

For citation: Minina T.R., Menshutkin V.V., Filatov N.N. About mathematical modeling in limnology, oceanology, ecology and economics in the works of V.V. Menchutkin. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 2, 119–133.

doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-10

ABOUT MATHEMATICAL MODELING IN LIMNOLOGY, OCEANOLOGY, ECOLOGY AND ECONOMICS IN THE WORKS OF V.V. MENCHUTKIN

Received 05.02.2024, Revised 13.05.2024, Accepted 15.05.2024

Abstract

The article gives a brief review of the works of Doctor of Biological Sciences, Prof. V.V. Menshutkin for the 65-year period of scientific activity, which began in the 60s of the XX century with experimental works on the hydrophysics of Lake Baikal and the first mathematical models of the perch population of the small lake Kherya-Yarvi (Karelian Isthmus) and fish community in Lake Dalneye (Kamchatka). The latter was of great practical importance when concluding an agreement with Japan on catch quotas for sockeye salmon.

V.V. Menshutkin's range of interests was very wide and included mathematical modeling in biology, physiology, limnology, oceanology, demography, economics, ecology and rational nature management. The works on research of water objects and processes in them include modeling of dynamics of fish and aquatic invertebrate populations, Antarctic krill. He created mathematical models of ecosystems of Ladoga and Onega lakes, and during oceanic expeditions of the Academy of Sciences — of the Sea of Japan and the Peruvian upwelling area.

His research in the field of physiology of blood circulation and water-salt metabolism, works related to space subjects, modeling of diagnostics and treatment of mental diseases are interesting. V.V. Menshutkin paid special attention to the issues of biological evolution. V.V. Menshutkin paid special attention to the issues of biological evolution and modeling of evolutionary process. The mathematical apparatus used by V.V. Menshutkin is very broad. The mathematical apparatus used by V.V. Menshutkin is very wide: from systems of differential equations to finite automata, neural networks, fuzzy logic and cognitive modeling (a new direction in artificial intelligence), with which the studies of ecological-socio-economic systems of water bodies catchments were connected.

O.P. Savchuk and V.V. Menshutkin united research methods — mathematical modeling and objects under study: oceans, seas and lakes. However, their only joint work was the collective monograph on the results of “Nevskaya Guba” project, which conclusions became the basis for the important decision to complete the construction of the dam in St. Petersburg.

Keywords: mathematical modeling, limnology, oceanology, economics, ecosystem, evolution, ecological-socio-economic system (ESE-system), cognitive modeling, artificial intelligence

1. Введение

Осенью 2023 года Владимир Васильевич Меншуткин¹ начал подготовку статьи, посвященной памяти О.П. Савчука, решив поделиться опытом применения математического моделирования и вычислительной техники в научных исследованиях за долгий, 65-летний период своей научной деятельности. Однако жизнь вносит свои коррективы, и ... в окончательный вариант статьи, основанный на незавершенном варианте В.В. Меншуткина, вошли материалы его научной биографии и опубликованных работ, в том числе и автобиографических [1–6].

Начало активной научной деятельности В.В. Меншуткина совпало с появлением первых ЭВМ в институтах Академии наук. Это и определило научное направление специалиста, получившего хорошее техническое и математическое образование, — математическое моделирование.

В.В. Меншуткин — представитель первого поколения отечественных модельеров в области биологии и экологии. Отметим две работы, которые имели большое практическое значение.

Модель популяции промысловой рыбы для определения максимально допустимого вылова при сохранении устойчивой численности облавливаемой популяции, созданная на данных об озере Дальнем (нерестово-нагульный водоем тихоокеанского лосося нерки, Камчатка) стала первой в СССР численной моделью водоема [7] и сыграла большую роль в соглашениях с Японией о квотах вылова, гарантирующих сохранение популяции нерки. Участвовавшие в работе д. б. н. Ф.В. Крогиус и д. б. н. Е.М. Крохин не только предоставили данные об озере Дальнем для создания модели — общение с ними способствовало получению В.В. Меншуткиным навыков вникать в сущность процесса, который предстоит моделировать. Можно сказать, что использование модели популяции промысловой рыбы, обеспечивающей сохранность популяции — одно из решений проблемы рационального природопользования, а В.В. Меншуткин одним из первых в нашей стране начал работы по этой проблеме [8]. По материалам исследования созданной модели в 1969 году вышла книга «Сообщество пелагических рыб озера Дальнего. Опыт кибернетического моделирования» [9]. В 1971 году авторам этой книги (Ф.В. Крогиус, Е.М. Крохину и В.В. Меншуткину) была присуждена Государственная премия СССР.

¹ В.В. Меншуткин — доктор биологических наук по специальности «гидробиология» (1972), лауреат государственной премии СССР (1971), профессор (1985), лауреат премии им. А.П. Карпинского (2006).

Успешность программы «Невская губа» (руководитель В.В. Меншуткин), предназначенной для анализа состояния Невской губы в зависимости от решения о возобновлении строительства дамбы, подтверждена удовлетворительным состоянием Невской губы в настоящее время.

С 1965 года В.В. Меншуткин как руководитель группы математического моделирования Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова (ИЭФБ РАН) работал над созданием моделей вместе с коллегами — специалистами в области биологии, физиологии и даже медицины. Знания в этих новых для него областях науки В.В. Меншуткин получал благодаря общению с такими крупными учеными как академики АН СССР физиологи Е.М. Крепс и Ю.В. Наточин, член-корр. АН СССР Г.Г. Винберг, биолог и генетик Н.В. Тимофеев-Ресовский. Глубокое понимание исследуемого процесса и умение выбрать наиболее соответствующий процессу метод, знание математики и методов оптимизации — основа высокого качества моделей В.В. Меншуткина, характерной чертой которых является их предельная конкретность. При создании модели он стремился, по возможности, лично участвовать в экспедициях, чтобы изучать исследуемые процессы вместе со специалистами в конкретной области, поскольку собранные исследователями и очень интересные с их точки зрения материалы не всегда могут быть использованы в математических моделях. Заметим, что такой же подход к научной деятельности был и О.П. Савчука.

С другой стороны, для моделей В.В. Меншуткина характерно широкое применение разнообразного математического аппарата и доведение исследований до работающих программных продуктов.

Особый интерес В.В. Меншуткин проявлял к вопросам эволюции, моделированием которой он увлекся благодаря знакомству с «отцом» русской кибернетики А.А. Ляпуновым (конец 60-х), опубликовав с 1977 по 2019 более 20 работ. Вопросы компьютерной имитации эволюционного процесса рассмотрены в [10–13], вопросы эволюционной физиологии (в соавторстве с академиком Ю.В. Наточиным) — в [14–18], но больше всего внимания, особенно в последние годы, В.В. Меншуткин уделял моделированию эволюции человеческого общества и биосферы [3, 19–22]. Заслуживает упоминания оценка В.В. Меншуткиным его совместной с коллегой, профессором В.Ф. Левченко (ИЭФБ РАН) работы по этому направлению: «По зрелому впечатлению модель человеческого общества, которую мы делали вместе с Левченко, нельзя признать в целом удачной. Но у этой модели было одно качество, которое отличало ее от обычных демографических моделей: люди в этой модели могли не только рождаться, вступать в браки, производить детей и умирать, но и изменяться сами и передавать эти изменения по наследству. От дарвиновской модели это построение отличалось принципиальным отсутствием естественного отбора. По своей конструкции модель была вероятностной и рассчитанной на прохождение 10000 лет. Пользуясь методом Монте-Карло, мы ожидали, что модель будет приходить к конечному результату с каким-то разбросом средней численности и возрастной структуры населения. Но модель повела себя несколько иначе. Во-первых, появились такие реализации, которые вели к полному исчезновению человеческого населения. Катастрофе предшествовали такие состояния модели, при которых большинство населения скатывалось к повальному эгоизму, при котором воспроизводство минимизировалось в угоду хорошей жизни. Во-вторых, те варианты, которые обеспечивали устойчивое состояние популяции, отличались низким уровнем жизни при сокращении общей численности населения при увеличении продолжительности жизни и почти полным отсутствием эгоистических особей. Конечно, в созданной модели было множество недостатков. Мы сознательно игнорировали национальные разнородности населения, войны, пандемии. Прогресс в области науки и техники также был представлен линейной функцией времени, что явно не соответствует действительности. Список упущений в этой модели можно было бы продолжить, но лучше вспомнить афоризм Козьмы Пруткова о том, что необъятное объять невозможно».

В 2010 году вышла капитальная монография В.В. Меншуткина «Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция)» (заметим, что даже в названии упомянута *эволюция*) [23], в которой автор излагает методологию и краткие сведения о математическом аппарате моделирования, а также приводит описание созданных им 50 моделей за полувековой период научной работы.

Большая часть работ В.В. Меншуткина посвящена изучению водных систем, в том числе, крупнейших озер России и мира: Байкала, Ладоги и Онего.

2. Работа по проекту «Невская губа»

В начале 90-х годов Президиум АН СССР поручил ленинградским ученым проанализировать ситуацию с состоянием Невской губы, если дамба (комплекс защитных сооружений от наводнений), строительство которой было заброшено в 70-х, будет построена. При поддержке Администрации города для оценки ситуации была выполнена научная программа Ленинградского научного центра АН СССР «Невская губа» (руководи-

телем был назначен В.В. Меншуткин). Целью исследования было создание компьютерной модели экосистемы «Ладожское озеро — река Нева — Невская губа» для анализа и прогнозирования состояния Невской губы при воздействии на нее антропогенных загрязнений для вариантов: (1) если уже построенную часть дамбы разобрать, (2) оставить как есть или (3) достроить.

Над созданием этой модели, сбором данных и их анализом работало несколько научных групп. Обобщающая модель, предназначенная для поддержки принятия решений Правительством Санкт-Петербурга, исполнителем которой было малое предприятие ЭКРОС при БГТУ ВОЕНМЕХ (руководитель — к. т. н. М.М. Степанов), опиралась на целый комплекс подмоделей. Это, во-первых, подмодель экосистемы Финского залива, как части модели Балтийского моря, разрабатываемой Стокгольмским университетом (к. г. н. Савчук О.П). Во-вторых, подмодель экосистемы именно Невской губы, создаваемая в Зоологическом институте РАН (д. б. н. Умнов А.А.). В-третьих, подмодель реки Невы — (ЭКРОС, В.В. Семенцов). В-четвертых, подмодель экосистемы Ладожского озера, создаваемая группой д. ф.-м. н. Л.А. Руховца (СПб экономико-математический институт РАН (СПб ЭМИ РАН)) при участии сотрудников Института озера-ведения РАН (ИНОЗ РАН) на основе данных, собранных Ладожскими экспедициями [24]. В работе принимали участие сотрудники Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН. Руководитель проекта В.В. Меншуткин не только обсуждал с каждым участником проекта вопросы о данных модели, но и лично принимал участие в сборе необходимой информации. В обобщающую программу поддержки принятия решений поступали результаты заранее разработанных режимов функционирования подмоделей. При передаче числовых массивов возникали серьезные трудности, так как моделирование осуществлялось на различных ЭВМ, и использовались различные языки программирования. Так, модель экосистемы Ладожского озера была реализована на машине БЭСМ-6 (СПб ЭМИ РАН), а в ЭКРОС — на персональных компьютерах Хьюлетт-Паккард.

Результатом работы над проектом стала компьютерная модель системы «Ладожское озеро — река Нева — Невская губа — восточная часть Финского залива» [25], с помощью которой проведено исследование возможных ситуаций: без дамбы, с состоянием дамбы на данный момент и как сложится ситуация, если строительство дамбы будет завершено.

Специальный демонстрационный вариант модели был представлен на расширенном заседании Городской думы Санкт-Петербурга и Объединенного научного совета по комплексной программе «Экология и природные ресурсы» Санкт-Петербургского научного центра РАН (СПбНЦ РАН) [26]. Практический вывод заключался в приемлемости тех экологических последствий, которые вносит дамба (при надлежащей очистке сбросов города Невская губа не зацветет, развитие фитопланктона в ней будет находиться в безопасных пределах) при возобновлении ее строительства. Результаты проекта отражены в коллективной монографии СПбНЦ РАН «Невская губа — опыт моделирования» [27].

Комплекс защитных сооружений не только спасает Санкт-Петербург от разорительных наводнений, но, соединив остров Котлин с южным и северным берегами Невской губы, решает транспортную проблему жителей Кронштадта и освобождает Санкт-Петербург от транзитного транспорта, улучшая экологическую ситуацию в городе.

3. Путь В.В. Меншуткина к моделированию сложных природных систем

Как пишет В.В. Меншуткин: «Участвовать в научной работе я начал в 1942 году метеонаблюдателем в экспедиции Г.Ю. Верещагина (профессор Г.Ю. Верещагин — Первый директор Байкальской лимнологической станции АН СССР) на ледоколе «Ангара» по Байкалу» [26].

Получив аттестат (1949 г.), диплом инженера-дизелиста (ЛКИ², 1955), проработав 3 года в ЦНИИ-45 им. акад. А.Н. Крылова, в 1958 году он вернулся на Байкал, став аспирантом Лимнологического института СО АН СССР³ по специальности «гидрофизика».

Три зимы аспирант В.В. Меншуткин прожил на льду Байкала, наблюдая через каждые 4 часа тепловой поток от водной массы в атмосферу. Расчёт тепловых потоков через байкальский лёд был выполнен на арифмометре «Рейнметалл». На Байкале В.В. Меншуткин не только освоил методы гидрофизики, но с появлением электронных вычислительных машин перенес громоздкие расчеты тепловых потоков с настольного арифмометра на ЭВМ.

² Ленинградский кораблестроительный институт.

³ В 1959 году это еще была Байкальская лимнологическая станция АН СССР, преемником которой в 1961 г. стал Лимнологический институт СО АН СССР.

О роли вычислительной техники в научном исследовании в 50–60-е годы прошлого столетия позволяет судить рис. 1, на котором представлена в самом общем виде типичная для того времени схема работ по изучению свойств некоего объекта с минимальным привлечением вычислительной техники (только для статистической обработки данных).

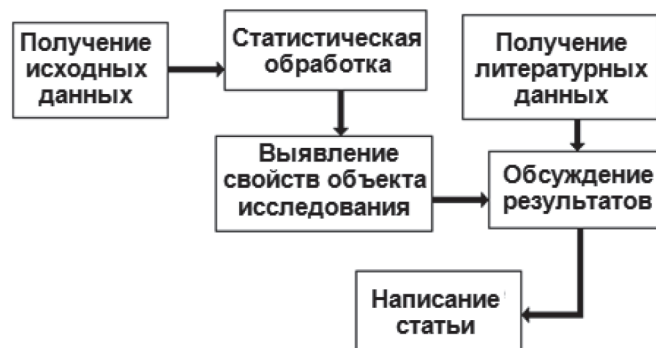


Рис. 1. Традиционная схема исследования объекта [26]

Fig. 1. Traditional scheme of object research drawing [26]

В.В. Меншуткин отмечает, что научился программировать еще в начале шестидесятых годов, когда компьютеры были громоздкими сооружениями, со смехотворным для настоящего времени быстродействием и объемом памяти. Освоил и успешно пользовался несколькими языками программирования и написал, без всякого преувеличения, сотни программ. В.В. Меншуткин более 60 лет занимался компьютерным моделированием сложных физиологических и экологических систем. Первые математические модели относились к проблеме определения максимально допустимого вылова промысловых рыб при сохранении устойчивой численности облавливаемой популяции. Это модели популяции окуня, обитающего в маленьком озере Херя-Ярви на карельском перешейке [28], и сообщества рыб в озере Дальнем на Камчатке [9]. Если модель популяции окуня из озера Херя-Ярви, построенная по данным, собранным ее создателями, оказалась только эпизодом в деле компьютерного моделирования в лимнологии, то работы на озере Дальнем основаны на уникальном материале, собранном д. б. н. Ф.В. Крогиус и д. б. н. Е.М. Крохиным о гидрометеорологическом, гидрохимическом и гидробиологическом состоянии озера, его температурном режиме, о планктоне и бентосе, о возрастном составе нерестящейся в озере нерки. Начиная с 1937 года, измерения проводились регулярно раз в 15 дней (в период ледостава — один раз в месяц).

Модель для определения допустимых норм вылова нерки (или красной), которые бы не допускали падения численности этой ценной рыбы, представляла собой изложение на языке программирования АЛГОЛ всех особенностей облавливаемых популяций рыб, орудий лова и стратегии рыболовства [9]. Как отмечено во введении, исследования, проведенные на основе этой модели, имели большое практическое значение для защиты интересов страны в области океанского рыболовства. Работы по сбору данных оз. Дальнее⁴ и исследованию популяций рыб озера были продолжены.

Став сотрудником ИЭФБ⁵ (1965 г.), В.В. Меншуткин приступает с коллегами по институту⁶ (специалистами разных профилей) к построению и исследованию моделей. Это были упомянутые выше работы с Ю.В. Наточиным [14–18] и с В.Ф. Левченко [19–22]. Модели [29–32] — пример того, как исходя из конкретной задачи и конкретного объекта моделирования, применялись различные математические аппараты для построения имитационных моделей. Так, первоначальные модели регуляции внутримозгового кровообращения (программа была написана в машинных кодах) основывались на численном решении уравнений гидродинамики, но для решения конкретной задачи реакции системы на гравитационные перегрузки (при значительных ускорениях и перегрузках у космонавтов) [29], более результативным оказался дискретный подход. В случае модели нервного механизма взлета и посадки саранчи (опыт моделирования системы, контролирующей полет) [30] и головного мозга человека [31] целесообразным оказался дискретный

⁴ Хорошие кормовые условия позволяют проводить в этом водоёме рыболовные работы и в настоящее время.

⁵ По приглашению академика Е.М. Крепса — директора Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова АН СССР (с 1967 года — руководитель группы математического моделирования).

⁶ Среди них профессора Ю.Е. Москаленко и Л.Я. Балонов, академики В.Л. Свидерский и Ю.В. Наточин.

подход. При моделировании водно-солевого обмена рыбы [32] применен аппарат конечно-разностных уравнений. В.В. Меншуткин отметил [23]: «Только благодаря их идеям и глубоким профессиональным знаниям удалось создать большинство моделей, охватив задачи от происхождения жизни на клеточном уровне до глобальных моделей биосферы Земли». Однако «выбор объектов моделирования и задач, решаемых при помощи моделей, в некоторой степени случаен...» [23].

С целью определения продукции [33] и возможного загрязнения водных экосистем В.В. Меншуткиным была создана серия компьютерных моделей экосистем озер Дривяты (Польша) [34], Ладожского [35] и Байкала [36], а также Японского моря [37], экваториального и перуанского апвеллингов в Тихом океане [38]. Опыт создания моделей водных экосистем обобщён В.В. Меншуткиным в монографии [39]. Наземные экосистемы моделировались на примере буковых лесов в Карпатах [40].

Кульминацией работ в области эволюционной физиологии явилась компьютерная модель дарвиновской эволюции, сначала на абстрактном примере [10], а затем и на материале эволюции гаммарид в озере Байкал [41].

Создавая модель озерной экосистемы или какой-либо ее части, всегда следует помнить, что в модели отражаются только те свойства оригинала, которые мы признали существенными. В процессе эксплуатации модели могут проявиться такие свойства, которые не были учтены при моделировании. Смысл моделирования заключается в том, что с моделью можно проводить такие эксперименты, которые на самом объекте моделирования просто невозможны (например, проведение на живом человеке острых опытов (т. е. заканчивающихся гибелью оригинала)) или когда стоимость экспериментов с оригиналом высока (занимают слишком много времени и материальных затрат). Так, модель популяции промысловой рыбы позволяет имитировать эффект уничтожения или необратимого подрыва рыбных запасов. С помощью модели, например, появляется возможность определения оптимальных режимов кормления рыб в рыбодонных хозяйствах, и подбора состава кормов с учетом их стоимости. Во всех подобных задачах ключевой проблемой является научно обоснованный критерий оптимизации, когда желаемый результат достигается при минимально возможных затратах.

Модель эволюционного процесса неизбежно предусматривает введение в модель стохастичности или «вероятностного мышления», по выражению академика А.Н. Колмогорова. Заметим, одной из важнейших заслуг Ч. Дарвина считается именно введение в биологию этого «вероятностного мышления», хотя сам Дарвин математическим аппаратом теории вероятностей в своих работах не пользовался.

Принятие вероятностного подхода существенно изменяет весь облик модели. Появляется необходимость обращения к датчику случайных чисел (RND) и многократному прогону модели с последующей обработкой результатов методами математической статистики.

Логика дальнейшего развития проблемы взаимодействия человеческой популяции с природной средой привела к моделированию эволюции антропосферы [21].

Рассмотрим, что же, собственно, представляют собой компьютерные модели сложных экологических и физиологических систем. «Одно из основных и трудно определяемых понятий в теории эволюции — это понятие сложности... Сложность — это не просто многочисленность элементов, из которых состоит система, но и разнообразие этих элементов и связей между ними. Сложность порождает не только устойчивость, но и способность к изменениям, к эволюции. Устойчивость, в свою очередь, является результатом саморегуляции, самоорганизации» [3]. За многозначным термином «сложный» скрывается целое научное направление под названием «теория сложных систем» [42]. В данном случае достаточно упомянуть, что сложная система отличается от простой не столько большим числом элементов, сколько тем, что ее математическое описание, если и удастся сформулировать в виде системы дифференциальных уравнений, то эти уравнения невозможно решить в виде квадратур. Крайний случай в этом смысле наступает, когда уравнения сложной системы вообще не удастся записать в виде традиционной математической формы. В качестве примера можно привести совместную работу с проф. Л.Я. Балоновым по моделированию диагностики и лечению психических заболеваний [31]. Тут не было не только формул, но и цифровых данных. «Всё базировалось исключительно на многочисленных случаях из врачебной практики профессора и его коллег. Пришлось создавать собственную систему кодировки данных и использовать математический аппарат непрерывной логики и нечетких множеств. Для проверки (идентификации) модели было использовано появление на рынке нового психотропного лекарства, которое было опробовано и на пациентах, и на модели. Сходство результатов было использовано для идентификации модели» [6, стр. 129–132].

По прошествии более 20 лет после публикации о моделировании и лечении психических заболеваний [31], В.В. Меншуткин, прочитав серию статей о когнитивном моделировании, понял, что они с Л.Я. Балоновым «самостоятельно дошли до идеи когнитивного моделирования. Наша модель была не моделью

головного мозга человека, как мы несколько наивно писали в своей статье. Она была моделью того, что знает о мозге профессор Балонов. Только эти знания были переведены с русского языка на язык вычислительной машины. Результаты расчетов переводились с машинного языка на русский. Это одно из основных направлений искусственного интеллекта [43], получившее в настоящее время широкое распространение» [6, стр. 132–133]. Это пример того, что высказывание Дж. Миллера [44] «Я двигался навстречу когнитивной науке в течение двадцати лет, прежде чем узнал, как это называется» вполне подходит В.В. Меншуткину.

В дальнейшем В.В. Меншуткин активно использует идеи когнитивного моделирования (например, [45]), замечая, что обращение к нему таит в себе опасность ложного преувеличения одних эффектов и снижения роли других, но такова плата за простоту программной реализации модели.

«Сущность когнитивного подхода заключается в замене непосредственного моделирования процессов, происходящих в реальном мире, моделированием процесса восприятия и познания этого мира человеческим сознанием [46, 47]. Отличительной чертой когнитивных моделей является создание базы правил, которые последовательно применяются при обработке массивов информации. В когнитивных моделях используются информационные связи между объектами» [48].

«Когнитивные модели ни в коей мере не смогут заменить модели традиционного типа. Термику и гидродинамику водоемов так или иначе придется рассчитывать по уравнениям Навье–Стокса [49], допустимые уловы рыбы по уравнениям Баранова и Бивертон–Холта [50], экономику по закону Кобба–Дугласа [51], а в социологии и политологии, возможно, применять агент-ориентированное моделирование [52]. В идеальном случае все частные результаты, полученные гидрофизиками, биологами, демографами, социологами должны быть переработаны в сознании специалистов с тем, чтобы в сжатой афористичной форме войти в состав когнитивной модели эколого-экономической системы» [48].

Как отмечено ранее, активизация хозяйственной деятельности на водосборе водного объекта ухудшает экосистему озера, приводит к росту антропогенной нагрузки, антропогенному эвтрофированию. Происходит количественное или качественное изменение водного объекта, вторичное загрязнение воды и нарушение всех видов водопользования, а в случае рекреационного использования водоема — к снижению эстетических достоинств ландшафта.

Для снижения негативного воздействия хозяйственной деятельности на экосистему водоема необходимо проведение широкого круга исследований в области лимнологии, математического моделирования, экономики, связанных с проблемой сохранения, восстановления и эффективного использования природных ресурсов больших стратифицированных озер. В этом случае моделирование играет главенствующую роль.

В 2010-е годы для изучения воздействия на экосистему озера экономических, социальных и демографических процессов, происходящих на территории его водосбора, модель экосистемы озера дополнили переменными, значения которых могли отличаться на несколько порядков, быть вероятностными и не количественными (качественными). В экологических моделях связующими являются балансы вещества и энергии, в экономике — понятия стоимости, а в социологии — процессы передачи информации. Потребовалась разработка эколого-социо-экономических систем (ЭСЭ-систем). В системах, переменные которых отличаются как по типу, так и по пределам изменений, не выполняется закон сохранения энергии, и к ним не применимы методы с использованием дифференциальных уравнений и систем таких уравнений в частных производных.

Для исследования ЭСЭ-систем водных объектов и их водосборов и частного случая — бассейна Белого моря (Беломорье) — был создан ряд когнитивных моделей [53–58].

Когнитивная модель ЭСЭ-системы водосбора крупного водоема [57] и ее реализация для бассейна Белого моря [58], в отличие от предыдущих, имеет иерархическую структуру и состоит из пяти подмоделей: демография, экономика, водные экосистемы, агроценозы и лесные экосистемы. Временной шаг всех подмоделей — один год. Вся модель исследуется на протяжении 100 лет.

Созданные модели использовались для прогноза развития бассейна Белого моря при различных сценариях развития экономики и возможных изменений климатических условий.

«Основной смысл экспериментов с разработанной моделью заключается не в том, чтобы давать многообещающие или предостерегающие прогнозы развития рыбного хозяйства в Белом море или демографические изменения в Беломорье, а в том, чтобы с помощью модельного подхода продемонстрировать возможность рассмотрения сложной системы путем синтеза разнообразной информации о компонентах в виде единой модели. По существу, это реальное воплощение идей искусственного интеллекта [59]» [48].

«Другим, не менее важным аспектом использования моделей эколого-экономических систем (которые относятся к сложным системам), является прогноз будущих состояний исследуемых объектов. В большинстве случаев для этого используются вероятностные модели, поскольку в большинстве популяционных,

экологических и эколого-экономических моделей, так или иначе, фигурируют условия внешней среды, которые очень редко можно считать постоянными. Для проверки прогностических свойств существует несложный прием. Необходимо располагать данными объекта и окружающей среды за N лет. При построении модели надо использовать данные об объекте и среде только за $N-1$ год. После этого надо посмотреть, к какому состоянию придет модель в год N . Разница между состояниями объекта в год N в действительности и по модельным данным свидетельствует о качестве моделирования [60]» [48].

Приведенных примеров из личной практики научных исследований достаточно для того, чтобы в общем виде представить схему научного исследования в современных условиях компьютеризации и развития методов искусственного интеллекта (рис. 2).

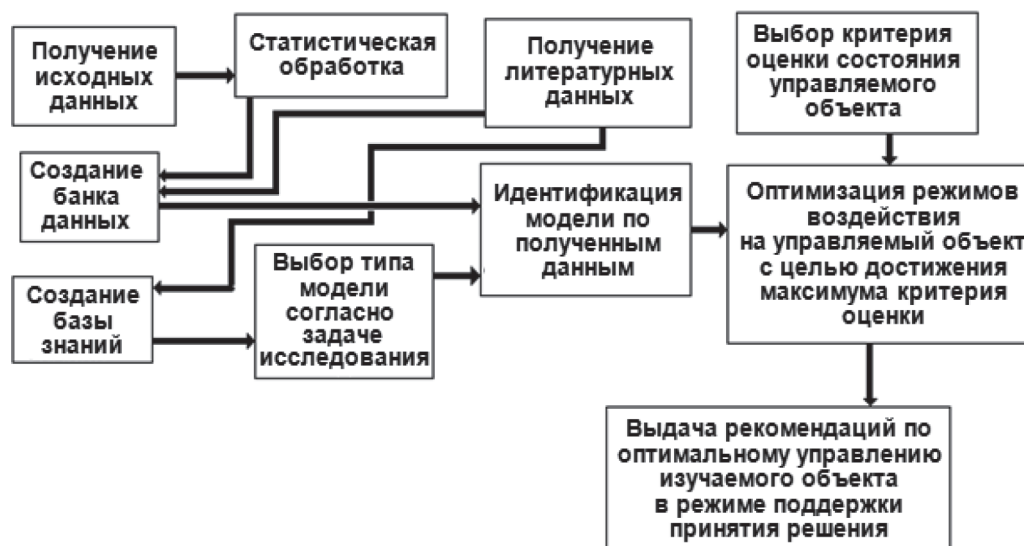


Рис. 2. Схема исследования объекта с применением компьютерных технологий и элементов искусственного интеллекта [26]

Fig. 2. Scheme of object research using computer technology and elements of artificial intelligence [26]

По этой схеме выполнялись описанные выше работы. Действительно, во всех случаях фигурировали исходные данные и их первичная статистическая обработка. В примерах с озером Дальнем на Камчатке, рекой Вартой и Невской губой базы данных фигурировали в виде самостоятельных элементов. В задаче моделирования эволюции позвоночных животных база знаний, по существу, представляла собой предельно сжатый и закодированный учебник по зоологии. Выбор типа модели диктовался особенностями объекта исследования. Для рыб и Невской губы это были системы дифференциальных уравнений, для реки Варты — уравнения в конечных разностях, для вертикальных миграций зоопланктона — аппарат случайных функций.

Для выполнения процедуры идентификации модели применялись данные, которые не использовались при построении модели. Критерий оценки состояния управляемого объекта выбирался исходя из специфики поставленной задачи. Для популяций рыб это был устойчивый вылов, для Невской губы и реки Варты — качество воды, для эволюции — выход животных на сушу. При переходе к исследованию динамики эколого-экономических систем в качестве критерия управления может выступать уровень жизни населения [56].

4. Об искусственном интеллекте

В последнее время системы искусственного интеллекта получают все более широкое применение в самых различных областях. В монографии об искусственном интеллекте [60] говорится, что существующие способы описания объектов и происходящих в них процессов приводят к столь громоздким структурам, что их практическое использование часто не представляется возможным.

Приведем основные положения «Проекта системы эколого-экономического интеллекта», предложенного В.В. Меншуткиным в 2023 году [48].

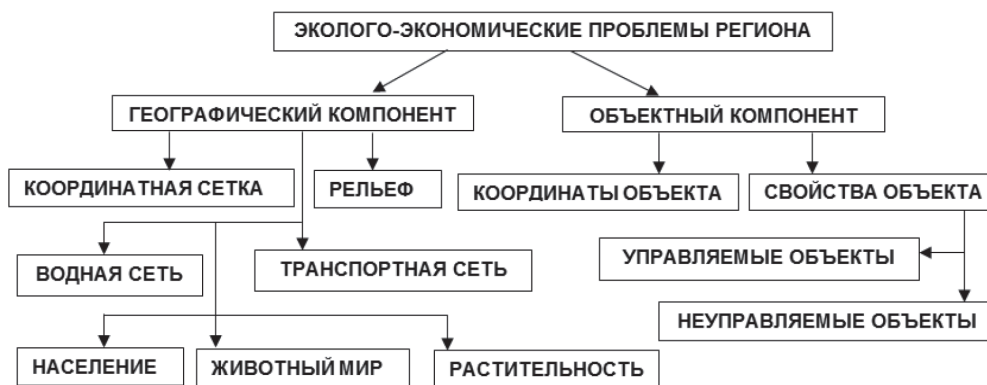


Рис. 3. Структура эколого-экономической модели региона [48]

Fig. 3. Structure of the ecological-economic model of the region [48]

В системе должно быть, как минимум, два компонента: географический и объектный (рис. 3). В географическом компоненте должны храниться не только всевозможные карты региона, но и климатическая, рекреационная информация, графы транспортных связей и другая информация, которая имеет картографическую привязку.

Объектный компонент содержит информацию о точечных объектах, например, промышленные предприятия, электростанции, шахты или карьеры для добычи полезных ископаемых или захоронения отходов производства, объекты жилого и культурного фонда и т. п. Каждый объект должен иметь перечень свойств, характеризующих его состояние. Свойства, как правило, должны иметь временную привязку, т. е. могут изменяться во времени.

На рис. 4 представлена одна из возможных схем функционирования модельного комплекса. Начальный этап заключается в формировании баз данных, необходимых для функционирования модели. Сначала выясняется, что именно необходимо, и генерируется начальное состояние модели. Далее начинается функционировать основной временной цикл, внутри каждого шага этого цикла осуществляется цикл по пространству с перебором по всем пространственным элементам. И только внутри этих двух циклов

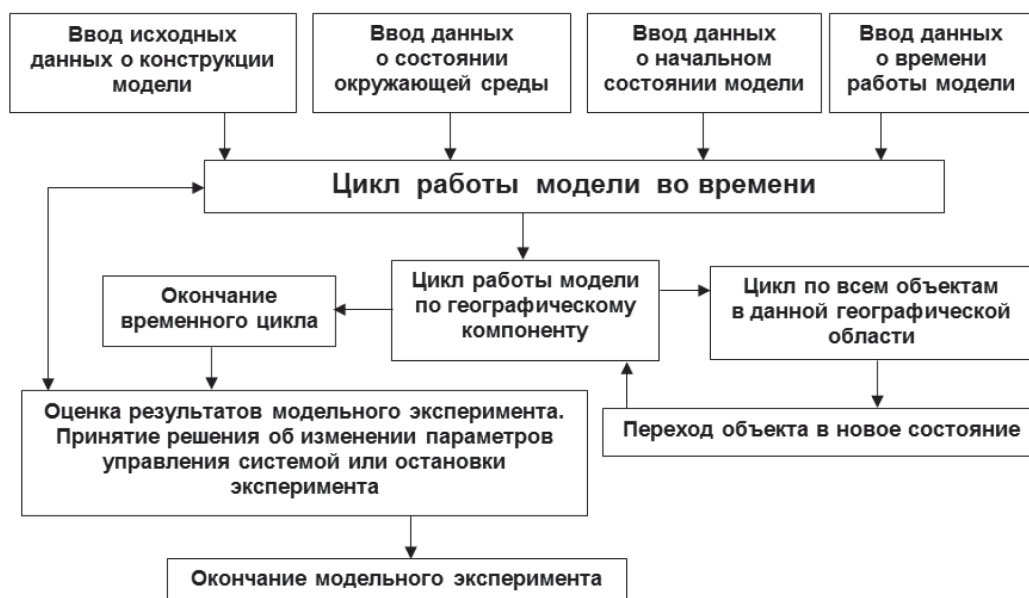


Рис. 4. Блок-схема функционирования модельного комплекса [48]

Fig. 4. Block diagram of the functioning of the model complex [48]

происходит перебор по элементам системы. По завершении заданного числа временных циклов происходит оценка полученных результатов, цель которой заключается в принятии решения об изменении управляемых внешних воздействий на систему. Альтернативным является решение о завершении всей работы.

Фундаментальное понятие, которое используется в системах искусственного интеллекта, — это понятие модели [23]. Под моделью понимается такой объект, который обладает не всеми, а только некоторыми свойствами реального объекта исследования. По существу, почти вся современная наука явно или неявно пользуется модельным подходом. Почти каждое научное достижение является или уточнением традиционной модели, или предложением новой, оригинальной модели.

В создании системы эколого-экономического интеллекта существенную роль должно играть управление воздействия со стороны человеческого общества, в частности, населения, промышленности, транспорта, а также специальное, со стороны органов охраны природы [60]. В формулировке задачи управления необходимо указание средств управления и критерий успешности такого управления (целевая функция). Проведение натурных экспериментов с системой, как правило, или затруднительно, или невозможно.

5. Заключение

Применение вычислительной техники изменило подход к решению экологических проблем не только количественно, но и качественно, что видно из сравнения рис. 1 и рис. 2. Если в докомпьютерный период научное исследование ограничивалось, в основном, констатацией фактов и общими соображениями, то современная компьютеризация позволяет поставить вопрос о нахождении оптимального варианта взаимодействия человеческого общества и биосферы в свете парадигмы устойчивого развития.

Компьютерные модели В.В. Меншуткина в ихтиологии (окунь и камчатская нерка), модели водных экосистем, наконец, эколого-социо-экономические модели можно считать одними из первых в своей области.

Создание эколого-экономической системы может быть осуществлено только коллективом ученых. Необходимы профессиональные навыки и знания в таких не сходных друг с другом областях знания как программирование, математика, экономика, экология, ландшафтоведение, демография и других.

Видение Владимиром Васильевичем тенденций развития науки отражено в статье Н.В. Шадрина [62]: «Вряд ли возможно — да и стоит ли здесь? — говорить обо всём, что “натворит” Владимир Васильевич в моделировании. Следует лишь отметить, что он всё ещё в поиске, всё ещё творит. На недавней встрече с В.В. (октябрь, 2010) я расспрашивал его, чем он занят сейчас, о его видении тенденций развития моделирования. Из беседы с ним “... чем не жёстче, расплывчатее модель, тем адекватней реальности”, “... чем меньше в модели математических формул, тем лучше отражает она реальные экологические системы...”, “вообще лучшие — словесные модели, подобные описаниям в хороших учебниках...”».

В.В. Меншуткин считал, что резкое сокращения финансирования науки и подчинение РАН Министерству науки и высшего образования (такого не было со времен ее основания по указу Петра Первого) привели к трудным временам для науки. После 1917 года наука тоже была в тяжелом положении, не было средств, не было современного оборудования, но, по свидетельству очевидцев, был энтузиазм, который сейчас утерян.

Выживет ли наука в такой ситуации? Надежды на искусственный интеллект тут не имеют решающего значения. Наука как раз и нужна, чтобы создать этот самый интеллект. В.В. Меншуткин знал это по собственному опыту. Придерживаясь высказывания Норберта Винера «Вычислительная машина ценна только в той степени, в которой ценен использующий ее человек», Владимир Васильевич считал, что идея искусственного интеллекта очень полезна и перспективна в деле расширения и умения оптимально управлять сложными, как естественными, так и искусственными системами. и служить она должна для нужд человека.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы НИР ИПРЭ РАН № Г.Р. 122020500024-8, а Филатовым Н.Н. — в государственном задании ИВПС КарНЦ РАН FMEN2021-0007.

Funding

The work was carried out within the framework of the IPRE RAS research topic No. G.R. 122020500024-8, and by Filatov N.N. under the state assignment of the NWPI KarRC RAS FMEN2021-0007.

Литература

1. Меншуткин В.В. Путь к моделированию в экологии. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2007. 394 с.
2. Меншуткин В.В. Автобиографические заметки. Санкт-Петербург, 2008. 333 с.
3. Меншуткин В.В. Эссе об эволюции сложных систем (с лирическими отступлениями). Петрозаводск, 2012. 136 с.
4. Меншуткин В.В. Воспоминания о лимнологии и лимнологах, друзьях, коллегах, о разном...». Петрозаводск: Издание Карельского Научного центра РАН, 2014. 188 с.
5. Меншуткин В.В. Океанские экспедиции Академии наук. Дневники и заметки участника. СПб.: Нестор-История, 2018. 288 с.
6. Меншуткин В.В. Воспоминания и размышления. СПб.: Нестор-История, 2021. 198 с.
7. Меншуткин В.В. Реализация простейших моделей популяций рыб на электронной вычислительной машине // Вопросы ихтиологии. 1964. Т. 4, № 33. С. 625–631.
8. Меншуткин В.В. Рациональное использование природных ресурсов озера // В кн. Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Москва: Наука, 1967. С. 315–328.
9. Крогиус Ф.В., Крохин Е.М., Меншуткин В.В. Сообщество пелагических рыб озера Дальнего: опыт кибернетического моделирования. Ленинград: Наука, 1969. 86 с.
10. Меншуткин В.В. Опыт имитации эволюционного процесса на компьютере // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. Т. 13, № 5. 1977. С. 545–555.
11. Меншуткин В.В., Левченко В.Ф., Цендина М.Л. Моделирование эволюционного процесса на ЭВМ // Материалы X Всесоюзной школы «Математическое моделирование сложных биологических систем». М.: Наука, 1988. 260 с. С. 64–80.
12. Меншуткин В.В. Компьютерное моделирование процесса эволюции рыб // Вопросы ихтиологии. Т. 42, № 4. 2002. С. 543–548.
13. Меншуткин В.В. Компьютерная имитация различных типов эволюционного процесса // Журнал общей биологии. 2003. Т. 64, № 4. С. 328–336.
14. Наточин Ю.В., Меншуткин В.В., Черниговская Т.В. Общие черты эволюции функций гомеостатических и информационных систем // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 1992. Т. 28, № 5. С. 625–633.
15. Наточин Ю.В., Меншуткин В.В. Проблемы эволюции функций и функциональной эволюции в физиологии, экологии и технике // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 1993. Т. 29, № 4. С. 434–446.
16. Наточин Ю.В., Меншуткин В.В., Маслова М.Н. Анализ тенденции развития эволюционной физиологии и по материалам совещаний, посвященных памяти Л.А. Орбели // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 1993. Т. 29, № 1. С. 82–89.
17. Меншуткин В.В., Наточин Ю.В. Сочетанная эволюция пищеварительной, кровеносной и выделительных систем. Модельное исследование // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2007. Т. 43, № 3. С. 279–285.
18. Меншуткин В.В., Наточин Ю.В. Имитационное моделирование процесса эволюции от макромолекул до протоклеток и клеток животных // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2008. Т. 44, № 4. С. 435–442.
19. Меншуткин В.В., Левченко В.Ф. Модель эволюции человеческого общества и биосферы // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. IV. Часть II. СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2005. С. 167–181.
20. Левченко В.Ф., Меншуткин В.В. Попытка компьютерного моделирования эволюции человеческого общества // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2009. Т. 45, № 2. С. 252–255.
21. Меншуткин В.В., Левченко В.Ф. Основанная на вероятностных клеточных автоматах модель эволюции антропосферы // Биосфера. 2017. Т. 9, № 4. С. 275–285.
22. Меншуткин В.В., Левченко В.Ф. Модель эволюции человеческой популяции с использованием вероятностного агент-ориентированного подхода // В кн. В.В. Меншуткин Воспоминания и размышления. СПб.: Нестор-История, 2021. 198 с. С. 155–168.
23. Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск — Санкт-Петербург, 2010. 479 с.
24. Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 320 с.
25. Меншуткин В.В. Проект Невская губа. СПб: СПб Научный центр РАН, 1994. 43 с.
26. Меншуткин В.В. Опыт работы с применением вычислительной техники в экологических исследования // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 9. С. 157–162. doi: 10.17076/lim1480
27. Невская губа — опыт моделирования / Под общ. ред. д. б.н., проф. В.В. Меншуткина. СПб.: СПбНЦ РАН, 1997. 375 с.

28. Меншуткин В.В., Жаков Л.А. Применение математического моделирования в исследованиях по динамике численности популяции окуня // В кн.: Тезисы докладов 10-й Конференции по Биологии водоемов Прибалтики. Минск, 1963. С. 104–105.
29. Москаленко Ю.Е., Меншуткин В.В., Кисляков Ю.Я. О применении динамического программирования к исследованию регуляции внутричерепного кровообращения // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 1968. Т. 54, № 8. С. 923–929.
30. Свидерский В.Л., Меншуткин В.В., Умнов А.А. Нервные механизмы полета саранчи: опыт моделирования системы контролирующей полет // В кн. Физиология и биохимия беспозвоночных / ред. Крепс Е.М. Ленинград: Наука, 1968. С. 110–117.
31. Меншуткин В.В., Суворова Т.П., Балонов Л.Я. Модель функционального выключения одного из полушарий и нейрофармакологических воздействий на глубокие структуры мозга // Физиология человека. 1981 Т. 7, № 5. С. 880–888.
32. Наточин Ю.В., Меншуткин В.В., Бондаренко И.Б., Шахматова Е.И. Показатели водно-солевого обмена при некоторых хронических заболеваниях и в экстремальных условиях // Физиология человека. 1993. № 6. С. 60–66.
33. Меншуткин В.В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных / ред. Винберг Г.Г., Серия ИВР. Л.: Наука, 1971. 198 с.
34. Меншуткин В.В., Умнов А.А. Математическая модель экологической системы озера Дриваты // Экология. 1970. Т. 4, № 1. С. 3–10.
35. Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В. Петрова Н.А. Система моделей экологической системы Ладожского озера // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2002. Т. 9, № 2. С. 334–342.
36. Меншуткин В.В., Кожова О.М., Ащепкова Л.Я. Функциональная модель экосистемы озера Байкал // Гидробиологический журнал. 1978. Т. 14, № 3. С. 3–11.
37. Меншуткин В.В., Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Математическая модель экосистемы пелагиали Японского моря // Океанология. 1974. Т. 14, № 5. С. 880–887.
38. Меншуткин В.В., Цейтлин В.Б., Виноградов М.Е. Стохастический подход к моделированию экосистем апвеллинга // В кн. Экосистемы пелагиали Перуанского района Тихого океана / ред. Виноградов М.Е. М.: Наука, 1980. С. 257–267.
39. Меншуткин В.В. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 158 с.
40. Kozak I., Menshutkin, V. Prediction of the beech forest succession in Bieszczady Mountains using a computer model // Journal of Forest Science. 2001. Vol. 47, N 8. С. 333–339.
41. Меншуткин В.В., Ащепкова Л.Я. Моделирование процесса эволюции байкальских гаммарид // В кн. Долгосрочное прогнозирование состояния экосистем. Новосибирск: Наука, 1988. С. 198–214.
42. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы (пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума; под ред. С.В. Емельянова). Москва: Мир, 1978. 312 с.
43. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии // Москва: Наука, 1988. 280 с.
44. Миллер Дж. Когнитивная революция с исторической точки зрения // Вопросы психологии. 2005. № 6. С. 104–109.
45. Меншуткин В.В. Когнитивные модели в лимнологии. СПб.: Нестор-История, 2019. 146 с.
46. Паклин Н.Б. Нечетко-когнитивный подход к управлению динамическими системами // Искусственный интеллект. 2003. № 4. С. 341–355.
47. Носов К.Г. Когнитивный подход к решению задач моделирования и построению САПР // Прикладная математика и вопросы управления. 2015. № 1. С. 73–85.
48. Меншуткин В.В., Минина Т.Р. Экономическое развитие региона и природные ресурсы // Региональная экономика и развитие территорий: сборник научных трудов. Вып. 17 / под научной ред. канд. экон. наук Л.П. Совершаевой: ИПРЭ РАН. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2023. 204 с. С. 74–84. doi:10.52897/978-5-7310-6266-4-2023-17-74-83
49. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 196 с.
50. Максименко В.П., Антонов Н.П. Количественные методы оценки рыбных запасов Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО, 2003. 256 с. (Бюллетень журнала «Вопросы рыболовства». М., 2004).
51. Матвеев В.Д. Макроэкономика. СПб.: 2001. 230 с.
52. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированный подход). М.: Экономика, 2013. 295 с.
53. Меншуткин В.В., Минина Т.Р. Когнитивная модель взаимодействия человеческого общества с экологической системой водоема // Региональная экономика и развитие территорий. Сб. научных статей ИПРЭ РАН. 2017. СПб., 1(11). С. 160–167.

54. Меншуткин В.В., Минаева Т.П. Когнитивное моделирование как аппарат исследования эколого-экономических систем // Региональная экономика и развитие территорий. Сб. научных статей ИПРЭ РАН. СПб., 2018. 1(12). С. 157–163.
55. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н., Дружинин П.В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 4–17. doi:10.25283/2223-4594-2018-2-4-17
56. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н. Когнитивное моделирование влияния рыболовства на уровень жизни населения Беломорья // Труды Карельского научного центра РАН. Лимнология. 2019. № 9. С. 1–18. doi:10.17078/ll.1.120
57. Меншуткин В.В., Минаева Т.П. Моделирование эколого-социо-экономической системы водосбора крупного водоема // Сб. научных статей под ред. Л.П. Совершаевой. СПб.: ГУАП, 2020, 1(14). 328 с. С. 206–211.
58. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н. Моделирование эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 7, № 1. С. 113–131. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-113-131.
59. Левитин К.Е., Поспелов Д.А. Будущее искусственного интеллекта. 1991. М.: Наука, 302 с.
60. Тарасов В.Б. Логико-лингвистические модели в искусственном интеллекте: прошлое, настоящее, будущее. URL: <http://posp.raai.org/data/posp2005/Tarasov/tarasov.html> (дата обращения: 07.03.2016).
61. Папенов К.В. Экономика природопользования. Издательство МГУ, 2006. 928 с.
62. Шадрин Н.В. Владимир Васильевич Меншуткин: живой классик математического моделирования биологических систем (к 80-летию со дня рождения) // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 1, т. X. С. 104–105.

References

1. Menshutkin V.V. Way to modeling in ecology. *Saint Petersburg, Nestor-History*, 394 p. (In Russian).
2. Menshutkin V.V. Autobiographical notes. *Saint Petersburg*. 2008, 333 p. (In Russian).
3. Menshutkin V.V. Essays on the Evolution of Complex Systems (with Lyrical Digressions). 2008. Petrozavodsk, 136 p. (In Russian).
4. Menshutkin V.V. Memories about limnology and limnologists, friends, colleagues, about different things... *Publication of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014, 188 p. (In Russian).
5. Menshutkin V.V. Ocean expeditions of the Academy of Sciences. Diaries and notes of a participant. *Saint Petersburg, Nestor-History*, 2018. 288 p. (In Russian).
6. Menshutkin V.V. Memories and Reflections. *Saint Petersburg, Nestor-History*, 2021. 198 p. (In Russian).
7. Menshutkin V.V. Realization of simple models of fish populations on an electronic computer. *Voprosy Ichthyologii*. 1964, 4, 33, 625–631 (In Russian).
8. Menshutkin V.V. Rational use of natural resources of the lake. The cycle of substance and energy in lake reservoirs. *Moscow, Nauka*, 1967, 315–328 (In Russian).
9. Krogus F.V., Krokhin E.M., Menshutkin V.V. The Community of Pelagic Fishes of Lake Dal'nykh: Experience of Cybernetic Modeling. *Leningrad, Nauka*, 1969. 86 p. (In Russian).
10. Menshutkin V.V. Experience of simulating the evolutionary process on a computing machine. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 1977, 15, 5, 545–555 (In Russian).
11. Menshutkin V.V., Levchenko V.F., Tsendina M.L. Modeling of the evolutionary process on a computer. *Proceedings of the X All-Union School "Mathematical modeling of complex biological systems"*. Moscow, Nauka, 1988, 260, 64–80 (In Russian).
12. Menshutkin V.V. Computer modeling of the process of fish evolution. *Voprosy Ichthyologii*. 2002, 42, 4, 543–548 (In Russian).
13. Menshutkin V.V. Computer simulation of different types of evolutionary process. *Journal of General Biology*. 2003, 64, 4, 328–336 (In Russian).
14. Natchin Yu.V., Menshutkin V.V., Chernigovskaya T.V. General features of the evolution of the functions of homeostatic and information systems. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 1992, 28, 5, 625–633 (In Russian).
15. Natchin Yu.V., Menshutkin V.V. Problems of Evolution of Functions and Functional Evolution in Physiology, Ecology and Technology. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 1993, 29(4), 434–446 (In Russian).
16. Natchin Yu.V., Menshutkin V.V., Maslova M.N. Analysis of the trend of evolutionary physiology and on the materials of meetings dedicated to the memory of L.A. Orbeli. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 1993, 29, 1, 82–89 (In Russian).
17. Menshutkin V.V., Natchin Yu.V. Coupled evolution of digestive, respiratory, circulatory, and excretory systems: a model investigation. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2007, 43, 3, 335–341. doi:10.1134/S0022093007030088

18. Menshutkin V.V., Natochin Yu.V. Imitation modeling of process of evolution from organic macromolecules to protocell and animal cell. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2008, 44, 4, 514–523. doi:10.1134/S0022093008040133
19. Menshutkin V.V., Levchenko V.F. Model of evolution of human society and biosphere. *Economic and Mathematical Research: Mathematical Models and Information Technologies*. IV. Part II. SPb., SPb EMI RAS, 2005, 167–181 (In Russian).
20. Levchenko V.F., Menshutkin V.V. Attempt at computer modeling of evolution of the human society. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2009, 45, 2, 309–321. doi:10.1134/S0022093009020145 (In Russian)
21. Menshutkin V.V., Levchenko V.F. A stochastic cellular automata-based model of evolution of the anthroposphere. *Biosphere*. 2017, 9, 4, 275–285 (In Russian).
22. Menshutkin V.V., Levchenko V.F. Model of human population evolution using probabilistic agent-based approach. V.V. Menshutkin Memories and Reflections. Menshutkin Memories and Reflections. SPb., Nestor-History, 2021. 198 p., 155–168 p. (In Russian).
23. Menshutkin V.V. The Art of Modeling: Ecology, Physiology, Evolution). 2010. Petrozavodsk–Saint Petersburg, 479 p. (In Russian).
24. Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V., Petrova N.A., Rukhovets L.A. Modeling of Ecosystems of Large Stratified Lakes. Saint Petersburg, Nauka. 2003, 320 p. (In Russian).
25. Menshutkin V.V. Nevskaya guba project. Saint Petersburg, Saint Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences, 1994. 43 p. (In Russian).
26. Menshutkin V.V. Experience with the Application of Computing in Environmental Studies. Publication of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2021, 9, 157–162. doi:10.17076/lim1480
27. Nevskaya Guba — Experience of Modeling. Under general ed. Dr. B.N., prof. V.V. Menshutkin. Saint Petersburg: Saint Petersburg Research Center of the RAS. 1997. 375 p. (In Russian)
28. Menshutkin V.V., Zhakov L.A. Application of Mathematical Modeling in Studies on the Population Dynamics of Perch. *Theses of Reports of the 10th Conference on Biology of Water Bodies of the Baltic States*. Minsk, 1963, 104–105 (In Russian).
29. Moskalenko Yu.E., Menshutkin V.V., Kislyakov Y.Y. On the Application of Dynamic Programming to the Study of the Regulation of Intracranial Blood Circulation. *Physiological Journal of I.M. Sechenov*. 1968, 54, 8, 923–929 (In Russian).
30. Svidersky V.L., Menshutkin V.V., Umnov A.A. Nervous Mechanisms of Locust Flight: Experience in Modeling the System Controlling flight. *Physiology and Biochemistry of Invertebrates*. Ed. Kreps E.M. Leningrad, Nauka, 1968, 110–117 (In Russian).
31. Menshutkin V.V., Suvorova T.P., Balonov L. Ya. Model of Functional Shutdown of One of the Hemispheres and Neuropharmacological Effects on Deep Brain Structures. *Human Physiology*. 1981, 7(5), 880–888 (In Russian).
32. Natochin Yu.V., Menshutkin V.V., Bondarenko I.B., Shakhmatova E.I. Indicators of Water-Salt Metabolism in Some Chronic Diseases and in Extreme Conditions. *Human Physiology*. 1993, 6, 60–66 (In Russian).
33. Menshutkin V.V. Mathematical modeling of populations and communities of aquatic animals / ed. Vinberg G.G., IBP Series. L., Nauka, 1971, 198 p. (In Russian).
34. Menshutkin V.V., Umnov A.A. Mathematical model of the ecological system of Lake Drivyaty. *Ecology*. 1970, 4, 1, 3–10 (In Russian).
35. Rukhovets L.A., Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V., Petrova N.A. System of Models of the Ecological System of the Ladoga Lake. *Review of Applied and Industrial Mathematics*. 2002, 9, 2, 334–342 (In Russian).
36. Menshutkin V.V., Kozhova O.M., Aschepkova L. Ya. Functional Model of the Lake Baikal Ecosystem. *Hydrobiological Journal*. 1978, 14, 3, 3–11 (In Russian).
37. Menshutkin V.V., Vinogradov M.E., Shushkina E.A. Mathematical model of the pelagial ecosystem of the Sea of Japan. *Oceanology*. 1974, 14, 5, 880–887 (In Russian).
38. Menshutkin V.V., Tseytlin V.B., Vinogradov M.E. Stochastic Approach to Modeling of Upwelling Ecosystems. Ecosystems of Pelagial Ecosystems of the Peruvian Pacific Ocean (ed. Vinogradov M.E.). Moscow, Nauka, 1980, 257–267 (In Russian).
39. Menshutkin V.V. Simulation modeling of aquatic ecological systems. SPb., Nauka, 1993. 158 p. (In Russian).
40. Kozak I., Menshutkin V. Prediction of the Beech Forest Succession in Bieszczady Mountains Using a Computer Model. *Journal of Forest Science*. 2001, 47, 8, 333–339 (In Russian).
41. Menshutkin V.V., Aschepkova L. Ya. Modeling of the Process of Evolution of Baikal Gammarids. In: Long-term Forecasting of the State of Ecosystems. Novosibirsk, Nauka, 1988. 198–214 (In Russian).
42. Mesarovic M.D., Yasuhiko Takahara. General Systems Theory: Mathematical Foundations. Academic Press New York San Francisco London 1975 A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publisher. doi:10.1016/s0076-5392(08)x6129-6
43. Pospelov G.S. Artificial Intelligence — the Basis of New Information Technology. Moscow, Nauka, 1988. 280 p. (In Russian).

44. Miller J. Cognitive revolution from a historical point of view. *Voprosy Psichologii*. 2005, 6, 104–109.
45. Menshutkin V.V. Cognitive models in limnology. *SPb., Nestor-History*, 2019. 146 p. (In Russian).
46. Paklin N.B. Fuzzy-Cognitive Approach to the Control of Dynamic Systems. *Artificial Intelligence*. 2003, 4, 341–355 (In Russian).
47. Nosov K.G. Cognitive Approach to Solving Modeling Problems and Building CAD. *Applied Mathematics and Management Issues*. 2015, 1, 73–85 (In Russian).
48. Menshutkin V.V., Minina T.R. Economic Development of the Region and Natural Resources. L.P. Sovershaeva, Ed., *Regional'naja Jekonomika I Razvitie Territorij* [Regional Economy and Development of Territories] Collection of scientific articles. 17. IPRE RAS — Saint Petersburg, SPbGEU, 2023, 204, 74–84. doi:10.52897/978-5-7310-6266-4-2023-17-74-83 (In Russian).
49. Filatov N.N. Hydrodynamics of lakes. *SPb., Nauka*, 1991. 196 p. (In Russian).
50. Maksimenko V.P., Antonov N.P. Quantitative methods of fish stock assessment. *Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchat- NIRO*, 2003. 256 p. (Bulletin «Fishery Issues». M. 2004).
51. Matveenko V.D. Macroeconomics. *SPb.* 2001, 230 p. (In Russian).
52. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. Social modeling — a new computer breakthrough (agent-based approach). *Moscow, Economy*, 2013. 295 p. (In Russian).
53. Menshutkin V.V., Minina T.R. Cognitive Model of the Interaction of Human Society with the Ecological System of the Reservoir. *Regional'naja Jekonomika I Razvitie Territorij*. Collection of scientific articles IPRE RAS. *Saint Petersburg*, 2017, N1(11), 160–167 (In Russian).
54. Menshutkin V.V., Minina T.R. Cognitive Modeling as a Research Tool of Ecological and Economic Systems. L.P. Sovershaeva, Ed., *Regional'naja Jekonomika I Razvitie Territorij*. Collection of scientific articles of IPRE RAS. 2018. *Saint Petersburg*, 1(12), 157–163 (In Russian).
55. Menshutkin V.V., Filatov N.N., Druzhinin P.V. A Current State and Forecasting of the Socio-Ecological-Economic System of the White Sea Watershed with use Cognitive simulation. *Arctic: Ecology and Economy*. 2018, 2(30), 4–17. doi:10.25283/2223-4594-2018-2-4-17 (In Russian).
56. Menshutkin V.V., Filatov N.N. Cognitive Modeling of the Fisheries Effect on the Standard of Living of the of the White Sea Area. *Transaction of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Limnology*. 2019, 9, 1–18. doi:10.17078/II.1.120 (In Russian).
57. Menshutkin V.V., Minina T.R. Modeling of the Ecological-Socio-Economic System of the Catchment Area of a Large Water Body. L.P. Sovershaeva, Ed., Collection of Scientific Articles Edited. *Saint Petersburg., GUAP*, 2020, Issue 1(14), 328 p., 206–211 (In Russian).
58. Menshutkin V.V., Filatov N.N. Modeling of the ecological-socio-economic system of the White Sea and its Watershed. *Physical Oceanography*. 2021, 28, 1, 104–121. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-104-121
59. Levitin K.E., Pospelov D.A. The Future of Artificial Intelligence. 1991. *M., Nauka*, 302 c. (In Russian).
60. Tarasov V.B. Logico-linguistic models in artificial intelligence: past, present, future. URL: <http://posp.raai.org/data/posp2005/Tarasov/tarasov.html> (date of reference: 07.03.2016) (In Russian).
61. Papenov K.V. Economics of Nature Management. 2006. Moscow State University Publishing House. 928 c. (In Russian).
62. Shadrin N.V. Vladimir Vasilievich Menshutkin: a living classic of mathematical modeling of biological systems (to the 80th anniversary of his birth). *Marine Hydrophysical Journal*. 2010, 1, X, 104–105 (In Russian).

Об авторах

МЕНШУТКИН Владимир Васильевич, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, профессор, SPIN-код: 8653-8133

МИНИНА Татьяна Ростиславовна, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-9238-4213, SPIN-код: 8942-8084, e-mail: trminina@yandex.ru

ФИЛАТОВ Николай Николаевич, главный научный сотрудник, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-3280-4375, Scopus AuthorID: 7005879364, SPIN-код: 5378-8040, e-mail: nfilatov@rambler.ru