АКАДЕМИК И.И.ВОРОВИЧ – ИНИЦИАТОР И СОРУКОВОДИТЕЛЬ РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ АЗОВСКОГО МОРЯ

DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-11-14

Ф.А. Сурков

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону
fasurkov@sfedu.ru

Аннотация. Среди математических моделей морских экосистем имитационная модель Азовского моря занимает особое место и по времени создания, и по детальности и адекватности описания экосистемы, и по признанию в научном сообществе. Описаны предпосылки возникновения идеи системного анализа и моделирования экосистемы Азовского моря, связанные с катастрофическим снижением к началу 70-х годов прошлого века его бывшей рекордной рыбопродуктивности. Описаны основные этапы создания модели, обеспеченность создаваемых моделей первичной информацией натурных наблюдений над компонентами экологической системы моря, выполненных в течение 20–40 лет сотрудниками Азовского НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ). Обоснован выбор учитываемых факторов внешней среды, учитываемых компонент экосистемы, перечислены блоки модели, взаимодействие которых и представляет собой воспроизведение функционирования экологической системы моря. Представлены основания выбора шага по времени, описана технология проведения имитационных экспериментов с моделью. Отмечено проведение всесторонней апробации промежуточных результатов моделирования экосистемы Азовского моря на многочисленных научных семинарах и конференциях, включая созданную в 1973 году и продолжающуюся поныне ежегодную всероссийскую конференцию «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». Описаны основные полученные научные и практические результаты, включающие формулирование обобщенного принципа Ле Шателье – Брауна для экосистемы Азовского моря, определение понятий «критических поверхностей» и «критических режимов» в пространстве параметров настройки модели экосистемы. Проанализированы реакции экосистемы на возмущения параметров настройки, сформулирован принцип локализации возмущений, экосистема Азовского моря была рассмотрена как система управления.

Ключевые слова: математическая модель экосистемы, имитационное моделирование, блочная структура модели, фазовый портрет экосистемы.

В начале 70-х годов прошлого века катастрофически снизилась рыбопродуктивность Азовского моря, уловы ценных пород промысловых рыб уменьшились на порядок. В качестве главной причины этого экологи указывали на заметно возросшую среднюю соленость моря, которая привела к изменениям всех звеньев трофической цепи экосистемы. Причиной повышения солености, в свою очередь, явилось уменьшение пресноводного стока главных рек, питающих море – Дона и Кубани. Уменьшение пресноводного стока рек было связано с бурным развитием орошаемого земледелия на водосборных территориях, причем в перспективных планах всемогущего Минводхоза планировалось его дальнейшее наращивание, вплоть до полного использования всего пресноводного стока питающих море рек.

В те же годы началось снижение уровня Каспийского моря и, как следствие, потери в промысле осетровых на его акватории. Минводхоз стал разрабатывать планы переброски части стока северных рек в Волгу, и даже создал для разработки соответствующих проектов специальный институт – «Союзгипроводхоз». А для снижения солености Азовского моря Минводхоз предложил построить в Керчен-

ском проливе дамбу, отгораживающую его от более соленых вод Черного моря. Был создан даже технический проект этой дамбы, включавший устройства для возможности сохранения судоходства через Керченский пролив и регулируемые отверстия для обеспечения прохода хамсы – азовская хамса уходит на зимовку в более теплое Черное море.

К этому же времени относится создание в Ростове-на-Дону Северо-Кавказского научного центра высшей школы, а в его составе – Научно-исследовательского института механики и прикладной математики. Директором нового института был назначен член-корреспондент (впоследствии – действительный член (1990)) АН СССР И.И. Ворович. При выборе направлений научных исследований нового института директор решил попытаться использовать методы системного анализа и математического моделирования для того, чтобы объективно, с научной точки зрения, разобраться во всех перечисленных выше проблемах и оценить эффективность предлагаемых мер по оздоровлению экосистемы Азовского моря. Руководителем всего комплекса исследований проблемы согласился быть председатель Северо-Кавказского научного цен-

тра высшей школы член-корреспондент АН СССР Ю. А. Жданов, а руководителем математической части работы – член-корреспондент АН СССР И. И. Ворович.

Работа началась в 1972 году небольшим коллективом математиков, который постепенно стал достаточно многочисленным (до 50 чел.) и триумфально завершилась присуждением Государственной премии по науке и технике СССР 1983 года за работу «Имитационная модель экосистемы Азовского моря, как средство системного анализа, прогнозирования и управления природно-техническим комплексом».

Своим успехом работа, кроме естественного энтузиазма молодых исполнителей, обязана чрезвычайно удачному сочетанию многих факторов, главным из которых являлась достаточно высокая степень изученности экологической системы Азовского моря, обеспеченная усилиями специалистов по всем звеньям экосистемы – сотрудников Азовского НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ). Ими были собраны и исследованы наблюдения по взаимодействию фитопланктонных, зоопланктонных, бентосных и рыбных сообществ моря, а ряды наблюдений биомассы и численности популяций составляли от 20 до 40 лет! Для абиотических факторов – элементов водного баланса моря, ветровой активности, минерализации и содержании взвешенных и растворенных веществ ряды наблюдений доходили до 100 лет. Впоследствии нам никогда не приходилось сталкиваться с подобной степенью изученности других морских экосистем.

Вторым важнейшим фактором успеха работы явилась непрерывная апробация её промежуточных результатов на многочисленных научных семинарах и конференциях, в научных журналах и сборниках научных трудов. В 1973 году была организована и проведена Всесоюзная конференция «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования», которая стала ежегодной, дополнялась новыми научными направлениями, и продолжается до настоящего времени. Можно сказать, что на протяжении всех этапов работа была открыта для самой взыскательной критики научной общественности данной предметной области.

Третьим фактором явилась достаточно высокая оснащенность коллектива исполнителей вычислительной техникой – мощнейшей по тем временам ЭВМ БЭСМ-6, выполнявшей миллион операций в секунду(!).

Статистический анализ пространственного распределения компонент экосистемы позволил разделить акваторию моря на 7 районов (конечных элементов), достаточно однородных по экологическим показателям. Для описания отдельных процессов

в модели введена дополнительная пространственная детализация. Экологическая динамика в каждом районе описана 120 переменными состояниями, характеризующими основные биотические и абиотические компоненты экосистемы. Описанная система регулирования естественным образом организует все 120 переменных состояний в группы, соответствующие отдельным звеньям и процессам регулирования. Таким образом естественным путем была выбрана блочная структура модели, в которой над каждым блоком работал отдельный коллектив исполнителей. Чем это не прообраз нынешней микросервисной архитектуры информационных систем? Названия блоков объясняют их предназначение: «Внешние факторы», «Динамика вод», «Соленость», «Загрязняющие вещества», «Кислород», «Биогенные элементы», «Фитопланктон», «Зоопланктон», «Бентос», «Тюлька», «Бычок», «Хамса», «Лещ», «Тарань», «Судак», «Осетровые», «Прочая рыба». Шаг по времени в 5 суток был выбран как некоторый компромисс между характерными временами быстroteкущих и медленных процессов в экосистеме, таким образом годовая динамика моря составляла 73 модельных шага. Каждый район моря характеризовался 120-ю переменными, таким образом фазовый портрет всего моря представлял собой вектор размерности 840. Внутри блоков использовался подход мультимодельности, когда из нескольких вариантов моделирования выбирался самый адекватный по соответствию данным натурных наблюдений. Так например блок «Динамика вод» предназначенный для расчета водообмена между районами моря и водообмена Азовского моря с Черным через Керченский пролив в зависимости от балансовых составляющих – осадков, испарения, стока рек, а также ветровой ситуации. был выполнен в трех вариантах: 1) подробная модель с использованием классических уравнений гидродинамики и приближенных численных методов их решения на ЭВМ; 2) менее детальная модель, основанная на балансовых соотношениях и учитывающая специфику вызываемых ветром изменений уровня районов Азовского моря; 3) агрегированная модель, использующая соображения гидравлического характера. В первой модели применяется достаточно подробная трехмерная сетка, имеющая шаг по горизонтали 3 км и 6 слоев по глубине, во второй модели учитывается водообмен между 7 районами моря, а в третьей учитывается только водообмен через Керченский пролив. В этом же блоке рассчитывается концентрация солености по акватории моря. В первой модели это производится путем добавления уравнения динамики концентраций соли с учетом течений и процесса турбулентной диффузии, во вто-

рой используются балансовые соотношения солеобмена между районами, в третьей рассчитывается только средняя соленость моря

В 1981 году вышла монография [1] и две статьи в Докладах Академии наук СССР [2,3], содержащие подробное описание модели и выводов, которые были сделаны после многочисленных серий имитационных экспериментов с моделью. Так, например, имитационные эксперименты показали, что если многократно повторять один и тот же набор внешних воздействий на экосистему, то в ней устанавливается некоторый квазистационарный режим, но скорость установления этого режима уменьшается по мере приближения вектора параметров этих внешних воздействий к некоторым поверхностям. Таким образом были определены понятия «критических режимов» и «критических» поверхностей в пространстве параметров.

На основании серий имитационных экспериментов с моделью для экосистемы Азовского моря был установлен т. н. «Обобщенный принцип Ле Шателье – Брауна». Была проанализирована реакция экосистемы на возмущения параметров настройки. При переводе параметров настройки с одного режима изменения на другой в системе новый установившийся режим отрабатывается не сразу, а в результате некоторых переходных процессов, продолжительность которых зависит от удаленности параметров настройки от «критических поверхностей». Был сформулирован принцип локализации возмущений, заключающийся в том, что возмущение экосистемы в некотором ее районе оказывает убывающее воздействие по мере удаления от места локализации возмущения. Сам по себе принцип локализации достаточно ясен, однако расчеты по модели позволили установить количественные характеристики затухания возмущения, и их зависимость от состояния экосистемы. Наконец экосистема Азовского

моря была рассмотрена как система управления, которое может осуществляться путем изменения регулируемых параметров настройки, главным образом речного стока [3].

В 1982 году работа была представлена на заседании Президиума АН СССР, где получила высокую оценку. Потом были выполнены пионерские работы по моделированию экосистемы озера Байкал, озера Севан, озера Ханка, Охотского моря, озер Швейцарии.

В настоящее время технологии моделирования морских экосистем шагнули далеко вперед, в сравнении с приведенным выше описанием процесса создания математической модели экосистемы Азовского моря. Наша цель заключалась в том, чтобы показать, что почти полвека тому назад академик Иосиф Израилевич Ворович гениально увидел перспективность использования инструментария математического моделирования в этой новой и для него, и для Ростовского университета предметной области, и возглавил успешный первый опыт моделирования экосистемы Азовского моря, тем самым заложив основы научной школы математического моделирования в экологии и экономике Ростова-Дону. Все, кто имеет отношение к научной школе моделирования И.И. Воровича будут всегда признательны ему за это.

Изменился общественный строй и страна, но полноценные научные разработки не теряют своих важнейших достоинств – объективности и состоятельности и проявляются в многочисленных научных работах последователей, даже если те не удосуживаются делать ссылки на первопроходцев! Как здесь не вспомнить знаменитое высказывание А.С. Безиковича: «Репутация математика основывается на числе плохих доказательств, которые он придумал. И далее следует пояснение автора: «Работы первооткрывателей неуклюжи» [4].

Список литературы.

1. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря: математические модели / Под ред. И.И. Воровича. – М.: Наука, 1981. – 360 с.
2. Ворович И.И., Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Сурков Ф.А. Общая характеристика и описание имитационной модели Азовского моря // Докл. АН СССР, 256:5 (1981), 1052–1056.
3. Ворович И.И., Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Сурков Ф.А. Использование математической модели экосистемы Азовского моря для исследования закономерностей функционирования и структуры системы // Докл. АН СССР, 259:2 (1981), 302–306.
4. Дж. Литлвуд. Математическая смесь. – М.: Наука 1990. С. 42

**ACADEMICIAN I. I. VOROVICH – INITIATOR AND CO-LEADER
OF WORK ON CREATION OF AN IMITATION MODEL
OF THE ECOSYSTEM OF THE SEA OF AZOV**

F.A. Surkov

Southern Federal University, Rostov-on-Don

fasurkov@sfedu.ru

Abstract. Among the mathematical models of marine ecosystems, the simulation model of the Sea of Azov occupies a special place both in terms of the time of creation, and in the detail and adequacy of the description of the ecosystem, and in recognition in the scientific community. The preconditions for the emergence of the idea of system analysis and modeling of the ecosystem of the Sea of Azov, associated with a catastrophic decline by the beginning of the 70s of the last century, of its former record fish productivity are described. The main stages of creating a model are described, the provision of the created models with primary information of field observations over the components of the ecological system of the sea, carried out for 20–40 years by employees of the Azov Research Institute of Fisheries (AzNIIRKh). The choice of the environmental factors taken into account, the ecosystem components taken into account, is substantiated, the blocks of the model are listed, the interaction of which is the reproduction of the functioning of the ecological system of the sea. The reasons for choosing the time step are presented, the technology of conducting simulation experiments with the model is described. It was noted that a comprehensive testing of the intermediate results of modeling the ecosystem of the Sea of Azov was carried out at numerous scientific seminars and conferences, including the annual All-Russian conference “Mathematical Modeling in Problems of Environmental Management” established in 1973 and continuing to this day. The main scientific and practical results obtained are described, including the formulation of the generalized Le Chatelier – Brown principle for the Sea of Azov ecosystem, the definition of the concepts of “critical surfaces” and “critical modes” in the parameter space of the ecosystem model. The reactions of the ecosystem to disturbances of the tuning parameters are analyzed, the principle of localization of disturbances is formulated, the ecosystem of the Sea of Azov was considered as a control system.

Keywords: mathematical model of the ecosystem, simulation, block structure of the model, phase portrait of the ecosystem.

References

1. Rational use of water resources in the Sea of Azov basin: mathematical models / Ed. I.I. Vorovich. – M.: Nauka, 1981. – P. 360.
2. Vorovich I.I., Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Surkov F.A. General characteristics and description of the simulation model of the Sea of Azov // Dokl. USSR Academy of Sciences, 256:5 (1981), 1052–1056.
3. Vorovich I.I., Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Surkov F.A. Using a mathematical model of the Sea of Azov ecosystem to study the regularities of the functioning and structure of the system // Dokl. USSR Academy of Sciences, 259:2 (1981), 302–306.
4. Littlewood D. Mathematical mixture. – M.: Nauka 1990. P. 42.