

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Угольницкий Г. А.¹

*(Институт математики, механики и компьютерных наук
Южного федерального университета, Ростов-на-Дону)*

Замысел настоящего сборника состоит в демонстрации современного состояния российских исследований в области математической экологии с особым вниманием к методам оптимального управления и теории игр. По-видимому, представленные в сборнике статьи позволяют говорить о наличии двух встречных «потоков»: от сложившихся еще в Советском Союзе научных школ математической экологии к использованию теоретико-игровых моделей, с одной стороны, и от теоретико-игровых и организационно-управленческих исследований к экологическим приложениям, с другой. Рассмотрим сначала работы первой группы.

Статья Г.П. Астраханцева, В.В. Меншуткина, Т.Р. Мининой «Использование моделей экосистем больших озер для получения оценок ассимиляционного потенциала» продолжает многочисленную серию работ по математическому моделированию озерных экосистем и управлению ими, выполненных под руководством В.В. Меншуткина [3, 16, 19, 27, 31]. В статье рассматривается понятие ассимиляционного потенциала природных систем. В случае больших пресноводных озер анализ этого понятия связан с изучением процесса антропогенного эвтрофирования посредством проведения вычислительных экспериментов с моделью озерной экосистемы. В качестве одного из подходов к экономической оценке ассимиляционного потенциала озерных экосистем авторы предлагают использовать механизм торговли квотами на аукционе. Приводится обсуждение полученных результатов применительно к фосфорному загрязнению Ладожского озера.

¹ *Геннадий Анатольевич Угольницкий, заведующий кафедрой прикладной математики и программирования ЮФУ, доктор физико-математических наук, профессор (ougoln@mail.ru).*

Статья «Нормирование антропогенных воздействий на природную среду на основе эколого-экономических моделей» написана большим коллективом авторов (В.И. Гурман, Л.Ю. Дамешек, Г.Н. Константинов, С.Н. Насатуева, И.В. Расина, Т.В. Чемезова), принадлежащих к научной школе моделирования эколого-экономических систем В.И. Гурмана [13, 18, 20–22]. Математической основой здесь выступает принцип расширения в задачах оптимального управления, предложенный В.И. Гурманом и В.Ф. Кротовым. Нормирование воздействий на природную среду формализуется как обратная задача оптимального управления. Конкретный вклад статьи заключается в обобщении задачи нормирования на случай динамических размерностей переменных модели. Решение задачи нормирования авторы обоснованно связывают с проблематикой устойчивого развития. В работе приведен содержательный обзор исследований по этой тематике. В первом пункте статьи дается общая постановка обобщенной задачи нормирования и приводится основной результат с доказательством. Второй пункт содержит теоретический пример для линейных систем, а третий – практический пример задачи определения предельно допустимых выбросов с численными расчетами на реальных данных.

В статье А.И. Абакумова, Н.П. Иванко в соответствии с названием изучаются «Задачи управления рыбным промыслом в условиях квотирования». Эта работа также продолжает давние исследования по моделям оптимальной эксплуатации биологических ресурсов под руководством А.И. Абакумова [1, 2]. В статье исследуются возможности минимизации последствий от коллизий в морском рыбном промысле, возникающих между пообъектным способом формирования квот и многовидовым характером промысла. Показаны варианты линеаризации начальных нелинейных задач или линеаризованные способы их исследования и решения. Для задач оптимизации распределения квот и задач максимизации дохода от промысла приведены иллюстративные примеры. Намечены постановки игровых задач рыбного промысла.

В 1970-х годах в Ростовском государственном (ныне Южный федеральный) университете И.И. Ворович и А.Б. Горстко основали научную школу моделирования эколого-

экономических объектов на базе системного анализа и компьютерной имитации [10–12, 15, 18, 26, 28–29]. Это направление продолжают три представленные в сборнике статьи.

В работе В.Г. Ильичева, Л.В. Дашкевич, В.В. Кулыгина изучаются «Эволюционно-устойчивые характеристики Азовского моря при вариации донского стока». Предложена компьютерная эколого-эволюционная модель «биогенные элементы – водоросли». Обнаружено, что в асимптотическом режиме отношение органических форм азота и фосфора в экосистеме слабо изменяется, несмотря на сильную деформацию химического состава стока реки Дон. На основе вычислительных модельных экспериментов установлена причина этого явления. Определены эволюционно-устойчивые параметры благоприятных температур развития основных групп водорослей. Показано, что у теплолюбивых водорослей такие параметры единственны, а у холодолюбивых водорослей допускаются две реализации. Тематика работы тесно связана с идеями эволюционных игр.

В исследованиях под руководством Г.А. Угольницкого развивается концепция управления устойчивым развитием (в частности, эколого-экономических систем) на основе иерархических теоретико-игровых моделей [28–29]. В статье А.Э. Назирова, Г.А. Угольницкого, А.Б. Усова в рамках этой концепции рассматривается «Теоретико-игровая модель трехуровневой маркетинговой системы с учетом экологических требований». Система управления имеет вид «принципал – супервайзер – агент». Роли субъектов управления выступают производитель, посредник, с которым у производителя заключен договор комиссии, и торговое предприятие, реализующее в розничной сети продукцию производителя. С определенной долей условности предполагается, что основная цель производителя – выполнение экологических требований. Предложен алгоритм построения равновесия Штакельберга в игре трех лиц с учетом требования гомеостаза экологической подсистемы. В качестве метода иерархического управления в каждой паре «принципал – супервайзер» и «супервайзер – агент» используется побуждение, то есть воздействие ведущего игрока на функцию выигрыша ведомого. Приведен ряд характерных примеров с последующей интерпретацией полученных результатов.

В статье «Дифференциально-игровая модель предотвращения заморов в мелководных водоемах» концепция управления устойчивым развитием (Г.А. Угольницкий, А.Б. Усов, М.В. Пучкин) применяется к модели биологической кинетики мелководного водоема (А.И. Сухинов, А.В. Никитина, А.Е. Чистяков, И.С. Семенов). Предложены алгоритмы исследования модели в случае информационных регламентов динамических игр Гермейера Γ_{1x} и Γ_{2x} . Задача решается численно с помощью разработанного параллельного алгоритма, учитывающего архитектуру суперЭВМ с распределенной памятью. Предлагаемый алгоритм численного решения поставленной задачи на суперЭВМ с использованием метода k -средних позволяет существенно сократить время работы программного комплекса, численно реализующего модельную задачу динамики взаимодействующих популяций в Азовском море. Модель используется для прогнозирования изменения биомассы популяций в мелководных водоемах с учетом требований устойчивого развития.

К моделированию эколого-экономических систем можно отнести и статью А.А. Воронина, А.А. Васильченко, М.В. Писаревой, А.В. Писарева, С.С. Храпова «Проектирование системы эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования». В статье описывается программный комплекс поддержки решений по управлению эколого-экономической системой водосбора, включающий гидродинамические модели, модели обычной и многокритериальной оптимизации с учетом пространственной определенности, сценарное моделирование, геоинформационные технологии, экспертные и когнитивные процедуры, а также механизмы синтеза эколого-экономических воздействий. Работа насыщена фактическими данными и представляет интерес для практического использования.

Теперь охарактеризуем работы из «обратного потока». В 1970-х годах Ю.Б. Гермейер и Н.Н. Моисеев заложили основы информационной теории иерархических систем [7], которая использует обобщенный принцип гарантированного результата для анализа различных регламентов информационного взаимодействия игроков. Эта теория развита в монографиях [8–9], в

том числе применительно к управлению эколого-экономическими системами. В рамках указанной теории в статье В.А. Горелика и Т.В. Золотовой анализируются «Механизмы управления платежами, лимитами и штрафами в иерархических региональных моделях охраны окружающей среды». При этом особое внимание уделяется проблеме согласованности интересов элементов эколого-экономической системы, обеспечивающих ее устойчивое функционирование, и идеальной согласованности, при которой ведущий элемент дополнительно достигает глобального максимума своей целевой функции. Интересно, что при таком подходе динамическое по своей природе понятие устойчивого развития допускает исследование в статической постановке. В статье получен ряд новых результатов, касающихся возможностей согласования и идеального согласования интересов при назначении экологических платежей и штрафов. В частности, полученные результаты свидетельствуют о том, что обеспечить идеальное согласование интересов эколого-экономических агентов удастся далеко не всегда, и приходится ограничиваться менее амбициозными постановками задачи управления. Установлено также, что лучших результатов можно добиться при назначении дифференцированных экологических платежей.

Статья В.А. Горелика «Коррекция кооперативных игр как механизм стабилизации эколого-экономических систем» посвящена развитию методов решения несобственных задач посредством минимальной в некотором смысле коррекции исходной модели. Этот подход реализуется применительно к кооперативным играм с пустым S -ядром с приложениями к управлению эколого-экономическими системами. С математической точки зрения авторский подход представляется очень интересным, перспективным и заслуживают развития также предложенные эколого-экономические интерпретации результатов. В работе дана постановка задачи коррекции исходной кооперативно-игровой модели и выделены различные случаи параметров коррекции, приводящие к решению задач линейного и квадратичного программирования. Подробно рассмотрен наиболее интересный случай пропорциональной коррекции. Отдельно описано

использование сбалансированных покрытий в задаче коррекции, приведены теоретические и эколого-экономические примеры.

В 1970-х годах А.Я. Лернер и В.Н. Бурков основали математическую теорию активных систем [4], посвященную построению и исследованию механизмов согласования частных и общесистемных интересов. Это направление продолжает активно развиваться, в том числе в рамках предложенной Д.А. Новиковым теории управления организационными системами [5, 23]. В монографии [6] авторы продемонстрировали возможности применения идей теории активных систем к построению механизмов управления эколого-экономическими объектами. Четыре статьи сборника развивают указанное направление.

В статье В.Н. Буркова, И.В. Бурковой и С.А. Пузырева рассматривается «Принцип согласованного планирования в управлении социальными и эколого-экономическими системами». Эта работа относится к магистральному направлению теории активных систем – проблеме согласования интересов активных агентов. В статье исследуется управление сложными программами, состоящими из подпрограмм, распределенных функционально, административно или территориально. Во всех случаях успешная максимизация глобальной целевой функции Центра возможна лишь при условии учета интересов отвечающих за отдельные подпрограммы агентов. Идея принципа согласованного планирования состоит в оптимизации целевой функции Центра на множестве согласованных планов, при которых значения целевых функций агентов не меньше определенных величин. Основным методом решения задачи согласованной оптимизации служит сетевое программирование. Рассматриваются также механизмы совместного финансирования программ. Изложение иллюстрируется большим количеством примеров.

В статье В.В. Бреера, Д.А. Новикова, А.Д. Рогаткина исследуются «Модели порогового коллективного поведения в задачах управления эколого-экономическими системами». В рамках таких моделей исследуется поведение активных агентов, принимающих бинарные решения типа «действовать – не действовать». При этом принятие решения зависит от того, превышает ли характеристика окружающей обстановки некий порог, и та-

ких порогов у агента может быть несколько. Наилучшие ответы агентов приводят к дискретным динамическим системам, описывающим изменение во времени числа действующих агентов. Возникающие модели многопорогового коллективного поведения авторы применяют к трем эколого-экономическим примерам: моделям индивидуальных штрафов, индивидуальных и коллективных штрафов, стимулирования природоохранных инвестиций, выявляя при этом ряд интересных эффектов.

Статья Д.А. Новикова и А.Г. Чхартишвили описывает еще одно оригинальное направление развития теории активных систем – «Модели рефлексивных игр в задачах управления эколого-экономическими системами». Как известно, в предложенной авторами теории рефлексивных игр описывается поведение активных агентов при различных предположениях об их взаимной информированности, что приводит к возникновению наряду с реальными также «фантомных» агентов. С помощью указанного аппарата авторы анализируют несколько ситуаций, допускающих эколого-экономическую трактовку: число агентов на рынке, совместное производство, пороговые штрафы, согласование интересов управляющих органов. Приведенные простые модели убедительно доказывают актуальность эколого-экономических приложений рефлексивных игр с получением важных качественных выводов.

Наконец, А.В. Щепкин проводит «Анализ механизма продажи квот». В этой публикации теория активных систем сочетается с теорией управления рисками. Именно, исследована модель, в которой предприятие приобретает квоты (например, на выброс загрязняющих веществ), а Центр проверяет соответствие допускаемого квотой уровня риска с фактическим уровнем риска на предприятии. Предлагается формализованная процедура выделения квот, обеспечивающих желаемый уровень риска.

В научной школе Л.А. Петросяна (В.В. Захаров, Н.А. Зенкевич, В.В. Мазалов и др.) [14, 17, 24, 25] исследуются бескоалиционные и кооперативные дифференциальные игры с особым вниманием к проблеме динамической устойчивости решений. При наличии этого свойства никому из игроков не выгодно отступать от согласованных в начале игры стратегий на всем ее периоде вдоль оптимальной (слабая динамическая

устойчивость) или любой допустимой (сильная динамическая устойчивость) траектории конфликтно управляемой динамической системы. Указанная проблема имеет большое значение при анализе долгосрочных природоохранных и иных соглашений, заключаемых независимыми субъектами (фирмами, регионами, странами). Слабой (time consistency) и сильной (subgame perfectness) динамической устойчивости, в том числе применительно к эколого-экономическим системам, посвящено большое число работ не только российских, но и зарубежных авторов [30, 32]. К этому направлению можно отнести четыре публикации в настоящем сборнике.

В статье Е.В. Громовой и Л.А. Петросяна анализируется «Сильно динамически устойчивое кооперативное решение в одной дифференциальной игре управления вредными выбросами». В дифференциальной игре двух лиц найдено сильно динамически устойчивое кооперативное решение, удовлетворяющее также условию Д.В.К. Янга защиты от иррационального поведения.

Предметом статьи В.В. Захарова и А.Ю. Крылатова служит «Моделирование конкурентной маршрутизации экологически безопасных транспортных потоков на городской транспортной сети». Эта работа относится к одному из самых интенсивно развивающихся разделов современной теории игр – сетевым играм, использующим теоретико-графовое представление пространственных отношений между элементами моделируемой системы. Рассматривается задача выделения на городской транспортной сети «зеленых» подсетей и побуждения водителей к использованию экологически безопасных автомобилей. Проведен анализ конкурентного и кооперативного взаимодействия двух видов транспортных потоков («зеленых» и обычных) в сети. Для различных топологий сети находятся равновесия по Вардропу и Нэшу. Условия сбалансированности «зеленой» подсети с параллельными маршрутами получены в явном виде.

В статье В.В. Мазалова и А.Н. Ретгиевой изучается «Асимметрия в кооперативной задаче управления биоресурсами». Рассматриваются два вида асимметрии игроков: различные коэффициенты дисконтирования и разные горизонты планирования. Эти предположения имеют ясную эколого-экономическую интерпретацию. Определены кооперативные выигрыши и их рас-

пределения между асимметричными участниками. Для построения кооперативных выигрышей и стратегий игроков используется арбитражное решение Нэша. Показано, что применение арбитражного решения не только выгодно обоим игрокам, но и способствует улучшению экологической обстановки.

Наконец, внимание А.С. Ивановой и А.Н. Кириллова привлекли «Равновесие и управление в задаче сохранения видового состава биосообщества». Построено равновесие для динамической модели присутствия популяции в определенном местообитании. В случае переменной пищевой привлекательности ареала найдены значения интенсивностей изъятия особей, позволяющие сохранить видовой состав.

Конечно, в сборнике представлены далеко не все работы современных российских авторов в области математической экологии. Тем не менее, основная тема сборника – использование теоретико-игровых моделей в управлении эколого-экономическими системами – отражена достаточно полно и разнообразно. Хочется верить, что публикация сборника будет способствовать сплочению российских специалистов по математической экологии и дальнейшему развитию теоретико-игрового аппарата моделирования и управления эколого-экономическими системами.

Литература

1. АБАКУМОВ А.И. *Управление и эксплуатация в моделях эксплуатируемых популяций*. – Владивосток: Дальнаука, 1993.
2. АБАКУМОВ А.И. *Математическая экология*. – Владивосток: изд-во ДГУ, 1994.
3. АСТРАХАНЦЕВ Г.П., МЕНШУТКИН В.В., ПЕТРОВА Н.А. И ДР. *Моделирование экосистем больших стратифицированных озер*. – СПб.: Наука, 2003.
4. БУРКОВ В.Н. *Основы математической теории активных систем*. – М.: Наука, 1977.
5. БУРКОВ В.Н., НОВИКОВ Д.А. *Теория активных систем: состояние и перспективы*. – М.: СИНТЕГ, 1999.

6. БУРКОВ В.Н., НОВИКОВ Д.А., ЩЕПКИН А.В. *Механизмы управления эколого-экономическими системами*. – М.: Физматлит, 2008.
7. ГЕРМЕЙЕР Ю.Б. *Игры с противоположными интересами*. – М.: Наука, 1976.
8. ГОРЕЛИК В.А., КОНОНЕНКО А.Ф. *Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах*. – М.: Радио и связь, 1982.
9. ГОРЕЛИК В.А., ГОРЕЛОВ М.А., КОНОНЕНКО А.Ф. *Анализ конфликтных ситуаций в системах управления*. – М.: Радио и связь, 1991.
10. ГОРСТКО А.Б. *Математическое моделирование и проблемы использования водных ресурсов*. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1976.
11. ГОРСТКО А.Б., ДОМБРОВСКИЙ Ю.А., СУРКОВ Ф.А. *Модели управления эколого-экономическими системами*. – М.: Наука, 1984.
12. ГОРСТКО А.Б., УГОЛЬНИЦКИЙ Г.А. *Введение в моделирование эколого-экономических систем*. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1990.
13. ГУРМАН В.И. *Принцип расширения в задачах управления*. – М.: Наука, 1985.
14. ЗЕНКЕВИЧ Н.А., ПЕТРОСЯН Л.А., ЯНГ Д.В.К. *Динамические игры и их приложения в менеджменте*. – СПб.: Высшая школа менеджмента, 2009.
15. ИЛЬИЧЕВ В.Г. *Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах*. – М.: Физматлит, 2009.
16. *Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений* / [под ред. А.Ф. Алимова, Л.А. Руховца и М.М. Степанова]. – СПб.: СПб НЦ РАН, 2001.
17. МАЗАЛОВ В.В. *Математическая теория игр и ее приложения*. – СПб.: Лань, 2010.
18. *Математические модели и методы управления крупномасштабным водным объектом* / Ю.А. Анохин, А.Б. Горстко, Л.Ю. Дамешек [и др.]; [под ред. Г.Н. Константинова]. – Новосибирск: Наука, 1990.

19. МЕНШУТКИН В.В. *Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных*. – Л.: Наука, 1971.
20. *Модели природных систем* [под ред. В.И. Гурмана, И.П. Дружинина]. – Новосибирск: Наука, 1978.
21. *Модели управления природными ресурсами* [под ред. В.И. Гурмана]. – М.: Наука, 1981.
22. *Моделирование социо-эколого-экономической системы региона* [под ред. В.И. Гурмана, Е.В. Рюминой]. – М.: Наука, 2003.
23. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. – М.: Физматлит, 2007.
24. ПЕТРОСЯН Л.А., ЗАХАРОВ В.В. *Введение в математическую экологию*. – Л.: изд-во ЛГУ, 1986.
25. ПЕТРОСЯН Л.А., ЗЕНКЕВИЧ Н.А., ШЕВКОПЛЯС Е.В. *Теория игр*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
26. *Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря* / [под ред. И.И. Воровича]. – М.: Наука, 1981.
27. *Современное состояние экосистемы Ладожского озера* / Под ред. В.В. Меншуткина. – Л.: Наука, 1987.
28. УГОЛЬНИЦКИЙ Г.А. *Управление эколого-экономическими системами*. – М.: Вузовская книга, 1999.
29. УГОЛЬНИЦКИЙ Г.А. *Иерархическое управление устойчивым развитием*. – М.: Физматлит, 2010.
30. DOCKNER E., JORGENSEN S., LONG N.V. AND ETC. *Differential Games in Economics and Management Science*. – Cambridge University Press, 2000.
31. *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modelling* / [Rukhovets L., Filatov N. (Eds.)]. – Springer-Praxis, 2010.
32. LONG N.V. *A Survey of Dynamic Games in Economics*. – World Scientific Publishing Company, 2010.