

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЦИФРОВИЗАЦИЯ КАК ЗАДАЧА ИНЖЕНЕРНОЙ ЭКОЛОГИИ (ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ)

© 2023 г. Г. С. Розенберг¹, *, Н. В. Костина¹, Г. Э. Кудинова¹, А. Г. Розенберг¹

¹Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального
исследовательского центра РАН, Тольятти, Самарская обл., Россия

*e-mail: genarosenbrg@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

После доработки 21.01.2023 г.

Принята к публикации 23.01.2023 г.

Цифровизация (развитие информационного общества) затрагивает все аспекты нашей жизни, оказывая все более заметное (как положительное, так и отрицательное) влияние и на окружающую среду. Обсуждаются некоторые информационные технологии в сфере экологии, направления, цели и задачи цифровизации экологического знания и природопользования в России.

Ключевые слова: окружающая среда, цифровые технологии, экологические проблемы, экосистема, информация

DOI: 10.31857/S0042132423030092, **EDN:** QQFFTY

— Ты считаешь меня много-ученым?
— спросил как-то Конфуций ученика.
— А разве нет? — ответил тот.
— Нет, — сказал Конфуций,
— Я лишь связываю все воедино.
Я слышу и забываю. Я вижу и запоминаю.
Я делаю и понимаю.
Конфуций (ок. 551 до н. э.—479 до н. э.)

ВВЕДЕНИЕ

Наше время характеризуется процессом интеграции научного знания и его обогащения путем “скрещивания” различных научных направлений. Как справедливо более полувека тому назад отмечал известный американский специалист по исследованию операций Акофф (1971, с. 70), “мы должны отказаться от мысли, будто природа разделена на факультеты подобно университетам. Разделение труда по дисциплинам перестало быть эффективным”. Ту же мысль проводит и отечественный географ В.А. Шупер (2007, с. 302): “В науке нет и никогда не было полосатых шлагбаумов, их поставили чиновники для удобства управления”. Все это с полным основанием можно отнести к “инженерной экологии”. При этом, многие авторы придерживаются достаточно широкого (междисциплинарного) толкования содержания этого сравнительно нового научного направления – оптимальное использование человечеством природных ресурсов в глобальном масштабе, учитывающее биологические, технические и экономико-соци-

альные факторы; другие, – напротив, инженерной экологии “приписывают” более скромный спектр проблем (оценка степени вреда, наносимого природе индустриализацией производства). Во многом и первая, и вторая точки зрения исходят из примата прилагательного “инженерная” (область технических наук), а не существительного “экология”. Если же взять за основу тот факт, что “инженерная экология” является частью собственно “экологии”, то за этим направлением следует закрепить тот раздел экологии, где основные объекты – экосистемы – изучаются методологическими средствами, развитыми в рамках технических наук и системного подхода. При этом можно выделить следующие основные направления исследований (Розенберг и др., 2013):

- мониторинг окружающей природной среды;
- экологическое прогнозирование;
- экологическая оптимизация;
- конструирование экосистем с заданными свойствами.

Каждое из этих направлений должно опираться на значительные объемы экологической информации. Прежде всего, мониторинг выступает в качестве основного поставщика информации для экологического прогнозирования, экологическое прогнозирование (на основе моделирования) дополняет основную базу данных “модельной” информацией, что позволяет провести оптимизацию условий функционирования экосистем (в первую очередь с учетом безопасности жизнедеятельности), а это, в свою очередь, обеспечивает конструирование экосистем с заданными свойствами. Это позволяет признать важность информационных процессов для реализации разнообразных функций экосистем разного масштаба (включая и социо-эколого-экономические системы, СЭЭС). Некоторым объединяющим принципам теоретической экологии и теории информации была посвящена специальная статья (Розенберг, 2021); также обсуждалось и метафорическое использование понятий “экосистема” и “популяция” (Розенберг, 2020), что сегодня пропагандируется в рамках цифровизации всего. Здесь мы попытаемся обсудить некоторые технологии цифровизации (информатизации) самой экологии.

Переход к информационному и постинформационному обществу при наличии качественно меняющейся действительности показывает, что ставит перед обществом новые проблемы, в нем постоянно подготавливаются и средства для их решения. Это особенно наглядно можно видеть при информатизации экологического знания и моделировании структуры и динамики экосистем. Как известно, основная задача экологических исследований (Шитиков и др., 2005, т. 1, с. 12) состоит в накоплении, систематизации и анализе информации о количественном характере взаимоотношений между живыми организмами и средой их обитания с целью получения следующих результатов:

- оценка качества изучаемых экосистем (в конечном итоге – с точки зрения возможности их использования человеком);
- выявление причин наблюдаемых и вероятных структурно-функциональных изменений биотических компонентов и адресная индикация источников и факторов негативного внешнего воздействия;
- прогноз устойчивости экосистем и допустимости изменений и нагрузок на среду в целом;
- оценка существующих резервов биосфера и тенденций в их исчерпании (накоплении).

Главный тренд современного этапа цифровизации экологии – все подсчитать (численности тех или иных популяций, общий допустимый улов водных биоресурсов, баланс углерода на карбоновых полигонах, других веществ и энергии, выбросы и сбросы загрязняющих веществ и пр.), сделать эту информацию доступной и пригодной для реше-

ния природоохранных проблем и рационального природопользования (валидной и верифицированной), разработать соответствующие методы и модели для обработки и анализа этих данных (накопление, хранение, анализ и обработка больших массивов данных (BigData)). При этом, активно используется биологическая (экологическая) терминология (экосистемы Сбербанка, популяции образовательных организаций, конкуренция субъектов рыночных отношений и пр.) и географическая (экономический (промышленный) ландшафт (Шуппер, 2007; Тютюник, 2015), политический экватор (Брифинг Клуба..., 2017) и пр.). Вероятно, это было бы оправдано в метафорическом плане, “наводя” мысль исследователей-экологов на формирование других подходов и направлений поиска новых законов и закономерностей; но многие вполне серьезно считают, что если они назовут традиционные экономические, социальные и др. понятия терминами из “соседних” наук, то сразу произойдет и прорыв в их науках. Нечто подобное наблюдалось и в самой экологии 1960–70-х гг. прошлого столетия с привлечением бурно развивающейся информатики: вся информатизация экологии свелась к повсеместному вычислению количества информации с помощью тех или иных информационных индексов (Розенберг, 2010, 2021), и при этом практически незамеченной осталась содержательная часть теории информации, внимание экологов до сих пор не привлекли основные предельные соотношения для систем передачи данных, которые и составляют суть этой теории.

Завершу “Введение” словами американского эколога растений Пикетта с соавт. (Pickett et al., 2007, p. 15), что “содержание любых понятий имеет три размерности: 1) основное, наиболее обобщенное определение понятия; 2) понимание того, как концепция реализуется в моделях для конкретных мест или обстоятельств; 3) оценка метафорических коннотаций (дополнений) концепции. Эти размерности можно назвать: “значение”, “модель” и “метафора” или, альтернативно, “определение” (можно, с натяжкой, “мотив” для того, чтобы получилось ЗМ – Авторы), “спецификация” и “вображение”. То, где находится исследователь в этом трехмерном ментальном пространстве, имеет решающее значение для четкого использования понятий”. Рассмотрению этого пространства экологических представлений в ходе цифровизации экологии и посвящена настоящая работа.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Мотив (определения). Любое исследование, направленное на решение прикладных задач экологии, должно опираться на систему получения постоянной, достоверной и первично обработанной информации – это и есть мотив экомониторинга. Таким образом, переход от эмпирических оценок

к научно обоснованным методам принятия экологически верных решений лежит через создание системы экологического мониторинга – наблюдений и экспериментов, ориентированных на оценку и прогноз состояния окружающей природной среды, находящейся под антропогенным воздействием (Израэль, 1984). При этом целью мониторинга является не пассивная констатация фактов, а соответствующая обработка поступающей информации, автоматизация экологических наблюдений, оценка “меры диссонанса” данной экосистемы от эталонной (не нарушенной или используемой разумно, без ущерба для нее) и, как результат, обеспечение следующих основных направлений инженерной экологии: прогнозирования, принятия эколого-инженерных решений и выдача рекомендаций.

Модели. В качестве моделей экомониторинга часто выступает специально разработанный комплекс выполняемых по научно обоснованным программам инструментальных наблюдений и контроля (стационарных и передвижных) состояния компонентов природной среды и параметров внешнего воздействия на заданной территории (Веницианов и др., 2003). Качество и оперативность получаемой информации в этом случае во многом зависит от приборов, выполняющих функцию сбора и обработки данных, и от каналов связи. Такой подход позволяет получать длительные и единообразные ряды наблюдений в одной точке, что дает возможность разделить природную и антропогенную составляющие воздействий на экосистему. Эти массивы данных позволяют проводить достаточно качественную статистическую обработку, выявлять связи и взаимозависимости параметров. Иными словами, под собранную информацию подбирается та или иная корреляционно-регрессионная модель (можно говорить о пассивной базе данных).

Здесь следует кратко остановиться на самоорганизующихся регрессионных моделях, в частности методе группового учета аргументов (МГУА – Group Method of Data Handling, GMDH (Ивахненко, 1975)), которые, к сожалению, не часто используются в обработке данных экологического мониторинга (подробнее см. (Розенберг, 2013)). Основной идеей этого подхода является тезис о том, что вся информация о взаимодействии элементов исследуемой сложной системы заключена в экспериментальных данных и исследователю остается только извлечь ее оттуда. Синтез модели методами самоорганизации не требует глубокого понимания объекта и проникновения в механизм действия явления; самоорганизующаяся модель, как и имитационная, выполняет, в основном, предсказательную функцию теории данного класса систем. Еще одной отличительной особенностью самоорганизующихся моделей является универсальность алгоритмов их построения и наличие единственной модели оптимальной сложности. Алгоритмы МГУА – это прекрасный пример

цифровизации больших массивов данных, так как они основаны на принципе массовой селекции (зимствуют действующие природные механизмы и схематически повторяют агротехнические методы селекции растений или животных (Шитиков и др., 2005)). В настоящее время МГУА рассматривается как один из разделов прикладного статистического анализа, более того, как раздел регрессионного анализа, понимаемого в широком смысле (своего рода, интеллектуальное обобщение регрессионного анализа). От классической множественной регрессии МГУА отличается лишь использованием специфических квадратичных критериев внешнего или внутреннего типа, а также многорядными итерационными процедурами нахождения оптимального решения задачи.

В качестве конкретных примеров использования алгоритмов МГУА в экологических исследованиях можно назвать самоорганизующиеся модели для долгосрочных прогнозов экологической системы оз. Байкал (Ивахненко и др., 1980), моделирования сукцессионных процессов в растительности (Розенберг, 1981, 1984); динамики системы хищник–жертва (Брусиловский, Розенберг, 1981а, 1981б), прироста деревьев (Розенберг, Феклистов, 1982), прогнозирования токсикологических показателей поллютантов (Шитиков и др., 1986), оценки динамики численности сообществ зоопланктона (Розенберг и др., 1994).

Другой подход основан на сборе информации под конкретную модель структуры или динамики экосистемы (в т. ч. СЭЭС). Математическое моделирование процессов явлений не является самоцелью, апризвано способствовать более глубокому пониманию природы наблюдаемого явления. Таким образом, *дilemma курицы и яйца* в этом случае решается в пользу модели, которая становится основой для мониторинга и сбора необходимой информации (активная база данных). Это – многочисленные имитационные модели экосистем разного масштаба, для которых мониторинговые наблюдения позволяют оценить коэффициенты и граничные условия.

В качестве примера, весьма конспективно (для описания таких моделей, зачастую, требуются монографические работы; см., например, (Grassland Simulation..., 1978)), приведем модель педагогического сообщества экосистемы оз. Байкал (Ашепкова и др., 1978), в которой описаны межгодовые изменения осредненных энергетических характеристик этой экосистемы под воздействием внешних факторов. Модель имеет следующий общий вид:

$$\begin{aligned} db_1/dt &= r_{01} - q_1 - m_1 - \sum_j r_{1j} \\ db_i/dt &= \sum_i r_{ij} - q_i - m_i - u_i - \sum_j r_{ij} \quad i = 2, 3, \dots, 9 \\ db_{10}/dt &= \sum_{i=1}^8 m_i + \sum_{i=1}^8 u_i - r_{10,9} + A - S_1 - S_2, \end{aligned}$$

где b_i – биомассы следующих компонент: 1 – фитопланктон, 2 – эпишура, 3 – циклоп, 4 – макро-гектопус, 5 – омуль, 6 – пелагические бычки, 7 – голомынка, 8 – нерпа, 9 – бактерии, 10 – детрит; A – годовой приток аллохтонного органического вещества водами рек, S_1 – седиментация, S_2 – сток через р. Ангара: $S_1 = 6.7b_{10}$, $S_2 = 20b_{10}$. Кроме того, для омуля и нерпы под знаком второй суммы через соотношения $r_{5.0} = \phi_5 b_5$ и $r_{8.0} = \phi_8 b_8$ учтен прямо пропорциональный биомассам вылов этих видов. Остальные параметры обозначают: b_i – биомассы i -х компонент, r_{ij} – поток энергии от i -го компонента к j -му, q_i – энергетический обмен компонента i , m_i – потери энергии со смертью i -го компонента (q_i и m_i линейно зависят от b_i), u_i – неустановленные остатки пищи компонента i . Потоки энергии (рационы) определялись по формуле Меншуткина¹:

$$r_{ij}(b_i, b_j) = c_{\max}^j b_j \lambda_{ij} \frac{1 - e^{-\xi_i \delta_i}}{\delta_i},$$

где $c_{\max}^j(b_j)$ – удельный максимальный рацион ($c_{\max}^j(b_j) = \alpha_j e^{-\beta_j b_j}$), λ_{ij} – доля i -го компонента в питании j -го, α_j , β_j , ξ_i , δ_i ($i = \overline{2, 9}$ и $j = \overline{2, 10}$) – постоянные коэффициенты.

Авторы провели идентификацию более 50 коэффициентов модели, исследовали ее на устойчивость. Предварительные эксперименты с моделью (например, увеличение или понижение ежегодного притока аллохтонного органического вещества на 20% привел, соответственно, к повышению на 6% и понижению на 8% первичной продукции озера; двукратное увеличение добычи нерпы увеличил потерю биомассы популяции всего на 2% и пр.) показали ее существенную зависимость от коэффициентов (α_j , β_j , ξ_i , δ_i); “поэтому для проведения широкой программы машинных экспериментов и выдачи надежных рекомендаций по допустимым величинам тех или иных внешних воздействий или выбору рациональных режимов эксплуатации требуется содержательное уточнение этих параметров опытным путем специально для Байкала (выделено нами – Авторы)” (Ащепкова и др., 1978, с. 57).

Метафоры. Понятие “мониторинг” используется в рамках различных сфер научно-практической деятельности. Сложность формулировки определения этого понятия связана также с принадлежностью его как сфере науки, так и сфере практики: это и способ исследования реальности, используемый в различных науках, и способ обеспечения сферы управления различными видами

¹ В модели были испробованы еще два способа описания рациона – по формулам Вольтерра и Ивлева, но анализ этих моделей показал, что такое описание рациона не обеспечивает устойчивость решения.

деятельности посредством представления своевременной и качественной информации (Ганеева, 2005). И все-таки, впервые понятие “мониторинг” было использовано в экологии², что делает этот термин, в какой-то степени, занятым. Однако, когда речь заходит о постоянном наблюдении, отслеживании, контроле (все это перевод с англ. *monitoring*), толкования понятия “мониторинг” в рамках конкретных сфер его применения уже не кажется столь недопустимым. Так, социально-политический мониторинг (постоянный, систематический сбор информации в целях наблюдения и контроля за ходом развития какого-либо социально-политического явления или процесса и его прогнозирования (Осипов, 2021)), система эколого-правового (криминологического) мониторинга в решении проблемы обеспечения контроля экологической преступности (Тангиев, 2003), педагогический мониторинг (Алямовская, 2007) и даже мониторинг библиотечных кадров (Кудрина, 1999) не так режут слух, как, например, “бизнес-экосистема” (Пригода и др., 2020) или “экология языка” (Железнова, 2016).

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Мотив (определения). Задача прогноза структуры и динамики экосистем – наиболее очевидна и чаще других задач привлекала внимание исследователей. Но первоначально, рассмотрим, что такое собственно прогнозирование? Термин “прогнозирование” – видовое понятие, отражающее количественные характеристики знания о будущем состоянии определенных систем. Понятие “пророчество” тоже видовое, но оно характеризует знание о будущем, полученное от пророков – людей с Божиим даром (например, египетские жрецы, оракулы (Приходько, 1994) и пр.). Немного отличается по содержанию от “пророчества” еще одно видовое понятие – “предвидение”, оно имеет несколько магический оттенок (астрологи и пр.). Наконец, есть еще одно слово – “предсказание”, которое как видовое понятие отражает научные знания о будущем, характеризующие качественные характеристики объектов прогнозирования (Арутюнов, Свинцицкий, 2003, с. 42).

При решении задач экологического прогнозирования (и цифровизации этого процесса) необходимо уделять внимание трем основным аспектам: целям прогнозирования, разработке прогнозирующих моделей и проблеме оценки достоверности прогнозов. В самом общем виде целью экологического прогнозирования может быть предсказание структуры и динамических изменений экосистемы.

² Термин “мониторинг” впервые появился в рекомендациях специальной комиссии СКОПЕ (Scientific Committee on Problems of the Environment) при ЮНЕСКО в 1971 г., в связи с подготовкой Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде (1972 г.).

Таблица 1. Положительные и отрицательные стороны основных методов построения экологических предикторов

Название метода	“За”	“Против”
Классический регрессионный анализ	Хорошее математическое обеспечение Простота расчетов и интерпретации результатов Малая стоимость моделирования	Субъективность подбора вида прогнозирующего уравнения Омнипогрессионность (не включенные в модель факторы в силу их малой значимости в прошлом и настоящем, могут оказаться ведущими в будущем) Сравнительно низкая точность прогнозирования
Самоорганизующееся моделирование (МГУА, эволюционное моделирование, процедура “модельного штурма” (Брусловский, Розенберг, 1983))	Хорошее математическое обеспечение; синтез оптимальной для прогнозирования модели Высокая точность прогнозирования Минимум субъективности при подборе уравнений	Невозможность интерпретации результата Сложность оценки адекватности моделирования
Имитационное моделирование (Шенон, 1978; Розенберг, 2013)	Достаточно хорошая точность прогнозирования Высокая степень интерпретации результата	Высокая стоимость моделирования Высокая степень субъективности моделирования Отсутствие единого алгоритма моделирования (имитация – больше искусство, чем точная наука) Сложность оценки адекватности моделирования

стем. Спускаясь по “иерархии целей”, в каждом конкретном случае происходит уточнение целей, их детализация. Формулировка целей прогнозирования, в известной степени, накладывает ограничения на характер используемой для прогнозирования информации: от правильности постановки задачи прогнозирования зависит выбор значимых факторов.

Модели. Когда определены цели, успех прогнозирования будет связан с выбором адекватного метода моделирования. В силу многозначности понятия “модель” в науке и технике не существует единой классификации видов моделирования: классификацию можно проводить по характеру моделей, по характеру моделируемых объектов, по сферам приложения моделирования и т.д.

Все современные математические модели в экологии можно разбить на три класса (как один из вариантов). Первый – описательные модели: регрессионные и другие эмпирически установленные количественные зависимости. Они применяются обычно для описания отдельных процессов и зависимостей или включаются как фрагменты в большие имитационные модели. Второй – качественные динамические модели, которые воспроизводят механизмы и эффекты изучаемого процес-

са, такие, например, как колебательный характер изменения биомассы или образование неоднородной в пространстве видовой структуры. Третий класс – имитационные модели конкретных экологических и эколого-экономических систем, учитывающие всю имеющуюся информацию об объекте. Цель построения таких моделей – детальное прогнозирование поведения сложных систем или решение оптимизационной задачи их эксплуатации (Шитиков и др., 2011). Для целей экологического мониторинга и цифровизации представляют интерес модели первого (регрессионные, МГУА; рассматривались выше) и третьего класса (табл. 1).

Имитационное моделирование (англ. *simulation*) сводится к построению триады модель–алгоритм–программа. Готовая триада тестируется в “пробных” экспериментах. На этом этапе посредством цепочки усложнений (иерархии все более полных моделей) обеспечивается ее адекватность. После этого можно переходить к “опытам” с моделью, дающим (в представлении “модельера”) требуемые качественные и количественные свойства и характеристики моделируемой системы. Построение практически любых имитационных моделей представляет собой “применение фундаментальных законов природы, вариационных принципов, аналогий, иерархических цепочек”, а процесс по-

строения модели включает в себя следующие этапы (Самарский, Михайлов, 1997, с. 25):

- словесно-смысловое описание объекта или явления (“формулировка предмодели”);
- завершение идеализации объекта и упрощение описания (качественный анализ модели);
- переход к выбору или формулировке закона (вариационного принципа, аналогии и т.п.) и его записи в математической форме;
- “оснащение” модели (задание начального состояния и параметров объекта; верификация);
- модель исследуется всеми доступными методами (в том числе с применением различных подходов и вычислительных методов);
- в результате исследования модели достигается поставленная цель. При этом “должна быть установлена всеми возможными способами (сравнением с практикой, сопоставлением с другими подходами) ее адекватность – соответствие объекту и сформулированным предположениям” (Самарский, Михайлов, 1997, с. 25).

Плодотворность методологии имитационного моделирования при решении разнообразных экологических задач за прошедшие годы была неоднократно подтверждена многочисленными примерами. Так как, фактически, любая имитационная модель требует монографического изложения, назовем здесь только несколько моделей, с которыми мы знакомы достаточно близко: модели биогеохимических циклов в травяных экосистемах (Гильманов, 1978; van Dyne, 1966; Grassland Simulation, 1978), пустынных экосистемах (Мамихин, 2003), экосистемы оз. Дальнего (бассейн р. Паратурка, Камчатка (Крогиус и др., 1969; Меншуткин, 1971)), СЭЭС Азовского моря (Горстко, 1974; Горстко и др., 1984; Домбровский и др., 1990)³. И, естественно, нельзя не назвать, ставшие классическими, имитационные модели мировой динамики (Крапивин и др., 1982; Александров, Моисеев, 1984; Моисеев и др., 1985; Forrester, 1971; Meadows et al., 1972).

Эксперименты с глобальными моделями показывают смысловую непротиворечивость сделанных предположений о связи тех или иных переменных. Правда, необходимо учитывать определенную долю условности этих прогнозов – высокая степень агрегированности модели приближает данную имитацию к аналитическим моделям, для которых справедливы лишь качественные выводы. “Модель всегда создается с какой-то конкретной целью, и она должна быть полезна именно для этой цели – например, чтобы ответить на ряд конкретных вопросов. При использовании модели надо всегда помнить о ее ограничениях и о том,

что на все вопросы она ответы дать не может” (Медоуз и др., 2008, с. 154).

Метафоры. Естественно, экологи никогда не будут претендовать на то, что они первыми использовали представление и само понятие “прогнозирование”. Сам термин “прогноз” происходит от греческого *prognosis* (предсказание, предвидение о развитии чего-либо, базирующееся на определенных данных). Когда появилось понятие “экологическое прогнозирование” также не известно (точно после 1866 г., когда в работе Э. Геккеля появился сам термин “экология”); вполне возможно, его заимствовали из медицины: диагноз заболеваний – это и есть прогнозирование (так, “Прогностика” Гиппократа была написана в 400 г. до н. э. (Гиппократ, 1936, с. 309) и начиналась следующим образом: “Мне кажется, что для врача самое лучшее позаботиться о способности предвидения. В самом деле, когда он будет предузнавать и предсказывать у больных настоящее, и прошедшее, и будущее, и все то, что больные упускают при своем рассказе, то конечно, ему будут верить, что он больше знает дела больных, так что с большою доверчивостью люди будут решаться вручить себя врачу”).

Завершим этот раздел словами лауреата Нобелевской премии по литературе (1953 г.) Черчилля (<https://internetoteka.com/publication/14030>; не метафора, но афоризм): “Looking too far ahead is shortsighted. – Заглядывать в будущее чересчур далеко – недальновидно”.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Мотив (определения). Идеей “оптимизации” все больше и больше пронизываются все экологические исследования. Это касается не только оптимизации методов исследования, но и собственно оптимизации взаимодействий в системе человек–окружающая среда. Можно принять такое определение: “экологическая оптимизация – система мероприятий, направленных на максимальное соответствие форм природопользования и его технологий экологическим особенностям эксплуатируемого объекта” (Дёжкин, 2008, с. 72). В этом контексте, экологическая оптимизация становится объектом экологической цифровизации.

Модели. Создание математической модели экосистемы позволяет прогнозировать динамику системы и корректно выявлять управляющие воздействия на систему с целью оптимизации ее функционирования. Работ по экологической оптимизации – великое множество (разной степени сложности и подробности); назовем здесь, как и выше, только те модели, которые нам хорошо знакомы: модели динамики эволюции жизненного цикла (Терёхин, 2001), численности популяций (Скалецкая и др., 1979; Gatto et al., 1988),

³ Очень компактное изложение этой модели можно найти в монографии Г.И. Ризниченко и А.Б. Рубина (1993, с. 206–215).

структурой экосистем (Левич и др., 1993, 1996), СЭЭС (Ратнер, 2016).

Метафоры. Отечественный философ Ю.А. Гастев (1975, с. 14) писал: “в современном научном обиходе нет, пожалуй, более употребительного термина, чем слово “модель”. И при всем разнообразии и пестроте способов употребления этого термина, во всех оттенках вкладываемого в него смысла легко прослеживаются общие этимологические источники: французское *modèle* происходит (через итальянское *modello*?) от латинского *modus* (образец). С другой стороны, различные научные дисциплины и их комплексы настолько резко отличаются друг от друга по своему предмету и методам, что действительно общим, скажем, для естествознания и социологии, математики и искусствоведения, геологии и семиотики, физиологии и сопротивления материалов остается разве лишь единое представление о научном методе, с которым связывается убеждение в объективности предлагаемого данной научной теорией фрагмента картины Мира”.

Метафор со словосочетанием “экологическая оптимизация” практически нет; удалось найти только это: “Авторская трактовка понятия “оптимизация экологического состояния социальной среды”, которое рассматривается нами как определенный уровень целостного функционирования социума, проявляющийся в субъективном ощущении комфорtnости и влияющий на социальное самочувствие личности, группы, местного сообщества” (Питинова, 2003, с. 7). А просто “оптимизация” довольно часто используется в этом плане (можно сказать, “для красивого словца”, без применения содержательного аппарата оптимизации): “оптимизация жизни” (Huber, 2018), “оптимизация речевого воздействия” (Оптимизация..., 1990), “оптимизация глупости” (Göke, 2019).

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Мотив (определения). Конструирование экосистем необходимо в том случае, если создается совсем новая экосистема, либо восстановление природных экосистем невозможно, — в агроэкосистемах, на урбанизированных и промышленных территориях, в искусственных водоемах. Эмпирические исследования в этом направлении своими “корнями” уходят в глубокую древность, когда особи *Homo sapiens* начали культивировать полезные для себя растения, чем и заложили основы сельского хозяйства. Большая часть этих исследований (как, впрочем, и классические эксперименты Г.Ф. Гаузе по конкуренции видов) была направлена на вскрытие причин, дающих конкурентное преимущество тому или иному виду. Можно смело утверждать, что любая, самая сложная модель по мере ее упрощения (“зануле-

ния” коэффициентов) будет постепенно превращаться в классическую модель конкуренции Лотки–Вольтерра. Именно эти представления (конкуренция видов, разные типы их эколого-ценотических стратегий, процессы плотной упаковки видов в экологических нишах, поддержание устойчивости и высокого разнообразия и пр.) стали основой конструирования экосистем с заданными свойствами (примером может служить газон футбольного поля — необходимо создать экосистему, устойчивую к вытаптыванию с максимально низкой продуктивностью). Методы инженерной экологии позволяют перевести решение этих задач в практическую плоскость.

Модели. Модели конструирования экосистем с заданными свойствами опираются на современные экологические представления — конкуренция видов, разные типы их эколого-ценотических стратегий, процессы плотной упаковки видов в экологических нишах, поддержание устойчивости и высокого разнообразия и пр. Кроме того, эколого-экономические оценки тех или иных экосистем и их оптимизация должны рассматриваться также как элемент конструирования экосистем с заданными свойствами. С этой точки зрения особый интерес приобретает оценка экосистемных услуг, то есть тех выгод, которые человечество получает от экосистем (Бобылев, Захаров, 2014; Розенберг, 2015; Розенберг и др., 2017; Daily, 1997).

Тот факт, что экосистемы могут предоставлять человечеству некоторые услуги (снабжающие (пища, вода, лес, сырье), регулирующие (воздействие на климат, контроль над наводнениями, стихийными бедствиями, качество водных ресурсов и пр.), культурные (рекреационные ресурсы, эстетические и духовные ценности природы) и поддерживающие (почвообразование, фотосинтез, круговорот азота и пр.)), восходит, по крайней мере, к Платону (с 400 г. до н. э.), который понимал, что вырубка лесов может привести к эрозии почвы и высыханию источников (Daily, 1997). Однако, не для каждой из вышеперечисленных экосистемных услуг можно было создать адекватный рынок; такая возможность появилась после того, как в 1973 г. немецко-britанским экономистом Шумахером было введено понятие “природный капитал” (Schumacher, 1973). “Полная оценка экосистемных услуг является сложнейшей методологической, методической и практической задачей для всего мира. (...) Без решения этой задачи невозможен переход к новой экономике для человечества, приоритеты которой намечены в концептуальных документах международных организаций. Необходимо нивелировать риски перезаплутации и истощения экоуслуг, что возможно в случае адекватного учета экологического фактора при принятии экономических решений” (Бобылев, Горячева, 2019, с. 230, 231). Многочисленные исследования показали, что в настоящее

время есть несколько категорий экосистемных услуг, для которых реально использование компенсационных платежей и создание рынков. Это услуги по обеспечению пресной водой должного качества, поглощению углерода, сохранению биоразнообразия и эстетических свойств ландшафтов. Эти четыре продукта (каждый включает в себя целый перечень услуг) сегодня обладают сравнительно просто подсчитываемой экономической ценностью, которую возможно продать, если грамотно прорекламировать (Розенберг, 2012; Зиновьева, 2020, с. 9).

Каких-то специальных (имитационных) моделей для оценки экосистемных услуг при конструировании экосистем с заданными свойствами, нам удалось найти крайне мало (например, Грабарник и др., 2019). В основном, моделирование сводится к балансовым (аддитивным) уравнениям и разного рода индексам (например, оценка индекса скорректированных чистых накоплений (Тихонова, 2018). Все это делает весьма актуальной задачу синтеза и оптимизации такого рода моделей.

Метафоры. Начнем с афоризма: “Жизнь – это конструктор, который мы собираем сами” (<https://www.inpearls.ru/1284902>). Синонимом “конструирование экосистем с заданными свойствами” часто выступает “рекультивация” (от лат. *re* – приставка, выражающая возобновление, обратное действие, и *cultivo* – возделывание) – это направленное конструирование сообществ с заданными свойствами, устойчиво функционирующих в жестких условиях антропогенной среды. Метафор с “конструированием” не очень много. При этом есть вполне устоявшиеся и используемые, например, в управлении (“конструирование дерева целей” (Кюхельгартен, 2009; Полищук, 2012)), а есть и достаточно экзотические (существенно метафорические, например, “рекультивация сознания” (Меськов и др., 2016)).

ЭКСПЕРТНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА REGION

В распоряжении Правительства РФ от 8 декабря 2021 г. № 3496-р “Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования” находим пункты, относящиеся к “обновлению и созданию базы данных нового поколения природных объектов (экосистем)”, в вызовах (задачах) цифровой трансформации читаем: “создание нормативно-правовой и методологической базы”, создание федеральной государственной информационной системы лесного комплекса позволит “объединить достоверные цифровые базы данных о лесах Российской Федерации”, наконец, в последнем предложении этого документа говорится о необходимости “обновления и создания базы данных нового поколения природных объектов

(экосистем), включая недра, водные объекты, леса, среду обитания животных”.

В самом общем виде любая экспертная система должна состоять из базы знаний, базы данных предметной области, программы “решателя проблем”, области запросов и еще ряда специфических обслуживающих программ. “Под экспертной системой понимается система, объединяющая возможности компьютера со знаниями и опытом эксперта в такой форме, что система может предложить *разумный совет* или осуществить *разумное решение* поставленной задачи” (выделено автором цитаты (Нейлор, 1991, с. 9).

Созданная в ИЭВБ РАН база пространственно-распределенных данных для некоторой специальным образом заданной территории и соответствующая ей экспертно-информационная система (ЭИС) REGION являются одним из первых опытов цифровизации и комплексного анализа пространственно-распределенной информации и неоднократно были предметом рассмотрения (Розенберг, 1997, 2009; Костина, 2005, 2015а, 2015б; Костина и др., 2010; Розенберг и др., 2015).

Информация по СЭЭС территории собирается в виде различного рода карт распределения тех или иных параметров (масштаб ЭВМ-карт диктуют цели исследования; например, для Волжского бассейна он, примерно, равен 1 : 10000 000). Пространственно-распределенная информация ЭИС REGION охватывала следующий рубрикатор природных компонент:

- климат территории (особенности распределения температуры воздуха и количества осадков, а также ветрового режима);
- географо-геологическое описание (орография, дочетвертичный и четвертичный периоды развития региона, основные черты тектоники) и геохимическая обстановка;
- почвы и ландшафты, наличие особо охраняемых природных территорий;
- лесные ресурсы и распределение естественной растительности;
- животный мир (видовое распределение и фаунистические комплексы наземных позвоночных и птиц);
- население (демографическая ситуация и степень урбанизации территории);
- гидрология и гидрохимическое качество поверхностных вод территории;
- гидробиоценозы и их компоненты (фитопланктон, зообентос, водяные клещи, инфузории, микроскопические водные грибы, рыбные запасы);
- оценки качества воды и степени эвтрофикации водных объектов по видам-биоиндикаторам.

Обширные рубрики накопленных данных детально описывали распределение по территории техногенной нагрузки и антропогенных воздей-

ствий, в том числе загрязнение воздушного и водного бассейнов; распределение отходов производства и коммунального хозяйства (включая особо опасные вещества для состояния экосистем и здоровья человека); радиационная обстановка, места техногенных аварий и природных катастроф; транспортная и рекреационная нагрузки; сельскохозяйственная нагрузка (включая распределение по территории бассейна минеральных удобрений, распаханности территории, животноводческой и пестицидной нагрузок). Кроме того, в базу данных были включены параметры состояния здоровья населения, как критерий оценки качества среды.

В состав программного обеспечения ЭИС REGION входят блоки, реализующие функции обработки и визуализации данных, в т. ч. построение новых (интегральных) показателей путем линейной комбинации подмножества показателей, имеющихся в базе данных, либо по иным расчетным формулам (например, Райх, 1984; Розенберг, 1984 и мн. др.) и математическая обработка показателей базы с целью экологического районирования анализируемой территории, выявления участков, подверженных наибольшему антропогенному воздействию, оценки биотического и геохимического состояния отдельных природных комплексов и пр. Основная задача ЭИС – не только накапливать текущую или ретроспективную информацию, но и проводить комплексный анализ состояния экосистем региона, выполнять прогноз условий устойчивого социально-экологического развития территории. Для этого в составе программного обеспечения системы сформирована развитая библиотека методов и алгоритмов исследования причинно-следственных связей между факторами СЭЭС. Предусмотрено несколько алгоритмов синтеза комплексных показателей (индексов), которые образуют базу метаданных и характеризуют экологическое состояние различных участков исследуемой территории.

Для математической обработки данных, хранящихся в ЭИС REGION, для оценки сценариев возможного развития территорий в условиях различного антропогенного воздействия и моделирования связей в соответствующих СЭЭС, разработано специальное программное обеспечение, составляющее единую инструментальную среду пользователя: методы множественного регрессионного анализа, модели самоорганизации и нейросетевые модели. Блок “Моделирование связей” предоставляет широкие возможности для построения статистических моделей разного типа и уровня сложности. Кроме общепринятых индуктивных методов многомерного статистического анализа, охватывающих различные формы и модификации регрессионного анализа и распознавания образов, активно используются алгоритмы построения прогнозирующих моделей метода-

ми самоорганизации: эволюционное и нейросетевое моделирование, метод группового учета аргументов (МГУА (Ивахненко, 1975)). В качестве надстройки к библиотеке методов, разработана эвристическая процедура формирования “коллектива” предикторов, эффективность которого практически всегда оказывается значительно выше любого из его членов (Брусиловский, Розенберг, 1983; Костина и др., 2022). Структурные связи в “коллективе” выбираются таким образом, чтобы положительные свойства той или иной модели дополняли друг друга, а отрицательные – компенсировались (то есть срабатывал бы эффект системности типа “целое больше суммы своих частей”). Таким образом, при построении коллективного прогноза ищется экстремум показателя качества прогнозирования не только по параметрам отдельного прогноза, и не только путем выбора лучшего среди заданного списка отдельных моделей-претендентов, но и по возможным суперпозициям частных прогнозов.

В рамках блока “Моделирование связей” возможно провести эколого-экономическое районирование территории, оценить структуру и динамику природоохранных затрат (например, Кудинова, 2013, 2015), оценить состояние здоровья населения и на этой основе дать предложения по организации экологического мониторинга и управлению рациональным природопользованием в территории.

ЭИС REGION объединяет в себе иерархическую последовательность баз, образно интерпретируемую как “экологическая матрешка” (Розенберг, 2002; Костина и др., 2004): территория 24 областей и автономных республик Волжского бассейна (более 90% территории); территории Республики Башкортостан, Самарской, Ульяновской, Саратовской и ряда других областей; частные базы данных, описывающие либо отдельные регионы (например, г. Тольятти и прилегающая территория Ставропольского района), либо специализированные ресурсно-тематические блоки (например, динамику гидробиологических характеристик Куйбышевского водохранилища). По всем этим территориям с использованием ЭИС REGION проведен комплексный анализ соответствующих СЭЭС, результаты которых опубликованы (см. библиографию в работах: Розенберг и др., 2018; Здоровье населения..., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время совокупность построенных и реализованных на ЭВМ моделей, действующих геоинформационных (ГИС) и экоинформационных систем (ЭИС), сервисных программ и другого ЭВМ-обеспечения, уже создает хорошее поле деятельности и может трактоваться как вариант реализации принципов цифровизации экологии. Становление методологии и методов инженер-

ной экологии – это также еще один из путей к достижению устойчивого развития, постулированного рио-де-жанейровскими соглашениями 1992 г. “Развитие цифровых технологий привело к появлению зонтичного понятия “цифровая экосистема”, под которой понимают цифровые артефакты и инфраструктуру передачи данных, их хранения и обработки, пользователей систем, включая социальные, экономические, политические, психологические и иные факторы, влияющие на осуществление взаимодействий. Отдельное развитие получили работы, связанные с рассмотрением экологических систем, в которых роль активных конкурирующих агентов играли бизнес-организации” (Патаракин, Шустов, 2013, с. 63).

Обсуждаемые в статье измерения 3М (мотив (определение), модель и метафора) демонстрируют тот факт, что многомерные (многоаспектные) экологические понятия (на примере основных представлений инженерной экологии) должны свидетельствовать о степени зрелости науки: в сложившихся дисциплинах метафорические допущения должны быть исключены из основного определения с выбором в пользу конкретных моделей. Метафоры позволяют внедрить науку в сферу публичных обсуждений, но при этом создают проблему “распаковки багажа” противоречивых предположений и ценностей, которые являются необходимой частью социального и политического дискурса (Rozzi, 1999). Естествоиспытатели могут лучше использовать такие понятия и термины, если сначала признают их многомерный характер.

Завершим эту статью двумя цитатами. “Безумно идти против прогресса, нового цифрового развития мира как одного из путей совершенствования цивилизации в XXI в. Он, безусловно, нужен и придет, но, чтобы жить в новом мире и не навлечь разрушения текущих достижений, нужно готовиться к новым проблемам и рискам; быть духовно, гуманитарно, а не только технически готовым к его возможностям, его плюсам и минусам, достижениям и опасностям” (Кальнер, 2018, с. 67). А еще в 1951 г. венгеро-американский математик и физик фон Нейман (цит. по: Флейшман, 1982, с. 6) писал: “В будущем наука будет концентрироваться больше вокруг проблем организации, структуры, языка, информации, программирования и управления и меньше – вокруг проблем силы, движения, вещества, реакции, работы и энергии”, что подтверждает и процесс цифровизации экологии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акофф Р. О природе систем // Изв. АН СССР. Техн. киберн. 1971. № 3. С. 68–75.
- Александров В.В., Мусеев Н.Н. Ядерный конфликт глазами климатологов и математиков // Вестн. АН СССР. 1984. № 11. С. 65–76.
- Алямовская В.Г. Психолого-педагогический мониторинг в дошкольном учреждении компенсирующего вида. М.: Восхождение, 2007. 159 с.
- Арутюнов В.Х., Свинцкий В.М. Философия глобальных проблем современности: Учебное пособие. М.: Финансы, 2003. 90 с.
- Ащепкова Л.Я., Гурман В.И., Кожова О.М. Энергетическая модель педагогического сообщества оз. Байкал // Модели природных систем. Новосибирск: Наука, 1978. С. 51–57.
- Бобылев С.Н., Горячева А.А. Идентификация и оценка экосистемных услуг: международный контекст // Вестн. междунар. организаций. 2019. Т. 14 (1). С. 225–236.
- Бобылев С.Н., Захаров В.М. Экология и экономика: “зеленая” экономика и экосистемные услуги // Вестн. Самар. гос. эконом. ун-та. 2014. Спецвыпуск. С. 15–24.
- Брифинг Клуба экспертов Нижнего Поволжья: политический экватор 2017 года // Сайт “Инфокам”. 01.07.2017; сайт “BezFormata”. 11.01.2019. <https://kamishin.bezformata.com/listnews/politicheskij-ekvator-2017-goda/58737428/>
- Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. О возможности построения модели, удовлетворительно описывающей колебания в одной реальной системе хищник–жертва // Динамика эколого-экономических систем. Новосибирск: Наука, 1981а. С. 84–91.
- Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. Проверка неадекватности имитационных моделей динамической системы с помощью алгоритмов МГУ // Автоматика. 1981б. № 6. С. 43–48.
- Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. Модельный штурм при исследовании экологических систем // Журн. общ. биол. 1983. Т. 44 (2). С. 266–274.
- Веницианов Е.В., Виниченко В.Н., Гусева Т.В. и др. Экологический мониторинг: шаг за шагом. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 252 с.
- Ганеева Ж.Г. Определение понятия “Мониторинг” в различных сферах его применения // Вестн. Челяб. госуниверситета. Сер. 8. Экономика. Социология. Социальная работа. 2005. № 1. С. 30–3.
- Гастев Ю.А. Гомоморфизмы и модели (Логико-алгебраические аспекты моделирования). М.: Наука, 1975. 148 с.
- Гильманов Т.Г. Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1978. 169 с.

- Гиппократ.* Прогнотика // Избранные книги. М.: Биомедгиз, 1936. С. 307–328.
- Горстко А.Б.* О построении имитационной модели Азовского моря // Математические модели морских экологических систем. Киев: Наук. думка, 1974. С. 18–20.
- Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Сурков Ф.А.* Модели управления эколого-экономическими системами. М.: Наука, 1984. 119 с.
- Грабарник П.Я., Чертов О.Г., Чумаченко С.И. и др.* Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // Мат. биол. биоинформ. 2019. Т. 14 (2). С. 488–499.
- Дёжкин В.В.* Природопользование (курс лекций) / 3-е изд., исправ. и допол. М.: Изд-во МНЭПУ, 2008. 72 с.
- Домбровский Ю.А., Ильичев В.Г., Селютин В.В., Сурков Ф.А.* Теоретические и прикладные аспекты моделирования первичной продуктивности водоемов. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1990. 176 с.
- Железнова Е.Г.* К вопросу об экологии языка и экологической лингвистике // Науч. вестн. Южного ин-та менеджмента. 2016. № 3. С. 70–73.
- Здоровье населения и здоровье среды: *pro et contra*. [Коллектив авторов] / Ред. Г.С. Розенберг, Р.С. Кузнецова, Н.В. Костина, Н.В. Лазарева. Тольятти: Анна, 2021. 374 с.
- Зиновьева А.Е.* К вопросу классификации экосистемных услуг // Изв. Алтайского отд. Рус. географ. общества. 2020. № 1 (56). С. 5–13.
- Ивахненко А.Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техніка, 1975. 312 с.
- Ивахненко А.Г., Кротов Г.И., Чеберкус В.И.* Многорядный алгоритм самоорганизации долгосрочных прогнозов (на примере экологической системы оз. Байкал) // Автоматика. 1980. № 4. С. 28–47.
- Израэль Ю.А.* Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.
- Кальнер В.Д.* Цифровая экономика и экологическая безопасность жизнедеятельности // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22 (1). С. 62–67.
- Костина Н.В.* REGION: экспериментальная система управления биоресурсами. Тольятти: Самар. НЦ РАН, 2005. 132 с.
- Костина Н.В.* Анализ состояния и сценарии развития социо-эколого-экономических систем территорий разного масштаба с помощью экспертной информационной системы REGION. Тольятти: Кассандра, 2015а. 200 с.
- Костина Н.В.* Информационная система REGION: 25 лет развития и практического применения // Изв. Самар. НЦ РАН. 2015б. Т. 17 (4). С. 15–24.
- Костина Н.В., Крестин С.В., Розенберг Г.С.* Информационный аспект и принцип “экологической матрешки” при решении экологических проблем территорий разного масштаба // Экология. Экономика. Информатика: XXXII шк.-семинар “Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования” (13–18 сентября 2004 г.) / Тез. докл. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2004. С. 127–128.
- Костина Н.В., Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Розенберг Г.С.* “Модельный штурм” индексов устойчивого развития социо-эколого-экономических систем региона бассейна крупной реки // Россия: тенденции и перспективы развития. 2022. Т. 17 (1). С. 1124–1128.
- Костина Н.В., Розенберг Г.С., Шитиков В.К.* Экспертная эколого-информационная система REGION для бассейна крупной реки // Информ. ресурсы России. 2010. № 4. С. 7–13.
- Крапивин В.Ф., Свириджев Ю.М., Тарко А.М.* Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука, 1982. 272 с.
- Крогиус Ф.В., Крохин Е.М., Меншуткин В.В.* Сообщество пелагических рыб озера Дальнего. Опыт кибернетического моделирования. Л.: Наука, 1969. 86 с.
- Кудинова Г.Э.* Устойчивое развитие экономико-экологических систем региона. Тольятти: Кассандра, 2013. 130 с.
- Кудинова Г.Э.* Устойчивое развитие и экомодернизация эколого-экономических систем региона бассейна крупной реки. Тольятти: Кассандра, 2015. 209 с.
- Кудрина Е.Л.* Мониторинг библиотечных кадров в регионе как стратегия деятельности вуза // Науч. и техн. б-ки. 1999. № 4. С. 31–35.
- Кюхельгартен Г.* Системный подход в стратегическом управлении предприятием и “дерево целей”. М.: Академия, 2009. 255 с.
- Левич А.П., Алексеев В.Л., Рыбакова С.Ю.* Оптимизация структуры экологических сообществ: модельный анализ // Биофизика. 1993. Т. 38 (5). С. 877–885.
- Левич А.П., Булгаков Н.Г., Замолодчиков Д.Г.* Оптимизация структуры кормовых фитопланктонных сообществ. М.: Тов-во науч. издателей КМК, 1996. 136 с.
- Мамихин С.В.* Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирования и применение информационных технологий). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 172 с.
- Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д.* Пределы роста. 30 лет спустя. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2008. 342 с. (пер. с англ. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. Limits to Growth: The 30-year update. White River Junction (VT): Chelsea Green, 2004. 368 р.).
- Меншуткин В.В.* Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л.: Наука, 1971. 196 с.
- Меськов В.С., Попадейкин В.В., Тульчев В.В., Коломейцев А.Е.* Рекультивация сознания: знание и труд // Пед. науки. 2016. № 6 (81). С. 16–25.
- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М.* Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985. 272 с.
- Нейлор К.* Как построить свою экспертную систему. М.: Энергоатомиздат, 1991. 286 с.
- Оптимизация речевого воздействия / Ред. Р.Г. Котов. М.: Наука, 1990. 240 с.
- Осипов А.В.* Социально-политический мониторинг и социально-междисциплинарная предиктивная аналитика как инструменты и технологии консолидации политической власти // Вопр. политол. 2021. Вып. 11 (75). С. 3138–3144.

- Патаракин Е.Д., Шустов С.Б.* Цифровая экология: эколого-социальные сети и информационные экосистемы // Вестн. Мининского ун-та. 2013. № 3 (3). С. 60–78.
- Питинова М.Ю.* Оптимизация экологического состояния социальной среды. Автореф. дис. ... канд. социол. наук. Белгород: БелГУ, 2003. 18 с.
- Полищук Е.В.* Упорство ведет на... вершину. Обоснование дерева целей предприятия // Креативная экономика. 2012. № 4. С. 89–94.
- Пригода Л.В., Аликаева М.В., Чекеревац З.* Банковские экосистемы и маркетплейсы: тенденции цифровизации // Новые технологии. 2020. Т. 16 (6). С. 132–138.
- Приходько Е.В.* Оракулы в раннеклассической греческой литературе // Понятие судьбы в контексте разных культур. М.: Наука, 1994. С. 191–197.
- Райх Е.Л.* Моделирование в медицинской географии. М.: Наука, 1984. 157 с.
- Ратнер С.В.* Задачи оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам // Друкеровский вестн. 2016. № 2. С. 30–41.
- Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.* Математические модели биологических продукционных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 302 с.
- Розенберг А.Г.* Оценка экосистемных услуг для территории Самарской области // Актуальные проблемы экономики и права. 2012. № 3. С. 145–149.
- Розенберг А.Г.* Природный капитал и экосистемные услуги региона. Тольятти: Кассандра, 2015. 84 с.
- Розенберг А.Г., Костина Н.В., Кудинова Г.Э., Розенберг Г.С.* Экосистемные услуги как инновационная составляющая устойчивого развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 4. С. 48–53.
- Розенберг Г.С.* Сравнение различных методов экологического прогнозирования. Прогноз динамики экосистем // Экология. 1981. № 1. С. 12–18.
- Розенберг Г.С.* Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984. 240 с.
- Розенберг Г.С.* Информационная система REGION-VOL-GABAS как основа регионального мониторинга биоразнообразия // Мониторинг биоразнообразия. М.: РАН, 1997. С. 233–236.
- Розенберг Г.С.* Актуальные экологические проблемы Средней и Нижней Волги и их комплексный анализ (информационный аспект и принцип “экологической матрешки”) // Актуальные проблемы водохранилищ / Тез. докл. Борок: ИБВВ РАН. 2002. С. 253–255.
- Розенберг Г.С.* Волжский бассейн: на пути к устойчивому развитию. Тольятти: ИЭВВ РАН; Кассандра, 2009. 477 с.
- Розенберг Г.С.* Информационный индекс и разнообразие: Больцман, Котельников, Шенон, Уивер... // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии: Бюл. 2010. Т. 19 (2). С. 4–25.
- Розенберг Г.С.* Введение в теоретическую экологию / В 2-х т.; изд. 2-е. Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. 565 с.; Т. 2. 445 с.
- Розенберг Г.С.* Экосистемы в бизнесе: что стоит за словами и куда это может привести? // Биосфера. 2020. Т. 12 (4). С. 161–167.
- Розенберг Г.С.* Теоретическая экология и теория информации: некоторые объединяющие принципы // Принципы экологии. 2021. Т. 11. № 4 (42). С. 3–30. file:///C:/Users/chica/Downloads/article_12162.pdf.
- Розенберг Г.С., Феклистов П.А.* Прогнозирование годичного прироста деревьев методами самоорганизации // Экология. 1982. № 4. С. 43–50.
- Розенберг Г.С., Быков Е.В., Попченко В.И. и др.* 35 лет Институту экологии Волжского бассейна РАН: вчера, сегодня, завтра, библиография, инновации и многое другое. Тольятти: Анна, 2018. 326 с.
- Розенберг Г.С., Рянский Ф.Н., Лазарева Н.В. и др.* Общая и прикладная экология: учеб. пособие. Самара; Тольятти: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2013. 452 с.
- Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусловский П.М.* Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). Тольятти: ИЭВВ РАН, 1994. 185 с.
- Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Костина Н.В. и др.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620402 “Экспертно-информационная база данных состояния социо-эколого-экономических систем разного масштаба “REGION” (ЭИБД “REGION””). Дата регистрации 27 февраля 2015 г.
- Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, 1997. 320 с.
- Скалецкая Е.И., Фрисман Е.Я., Шапиро А.П.* Дискретные модели динамики численности популяций и оптимизация промысла. М.: Наука, 1979. 166 с.
- Тангиеев Б.Б.* Совершенствование геоинформационных технологий и автоматизированных систем экологического мониторинга по обеспечению безопасности акваэкосистемы региона на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области. СПб.: СПбГУВК, 2003. 243 с.
- Терёхин А.Т.* Оптимизационное моделирование эволюции жизненного цикла: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001. 53 с.
- Тихонова Т.В.* Современные методы оценки экосистемных услуг и потенциал их применения на практике // Изв. Коми НЦ УРО РАН. 2018. № 4 (36). С. 122–135.
- Тютюник Ю.Г.* Понятие промышленного ландшафта // Биосфера. 2015. Т. 7 (3). С. 280–288.
- Флейшман Б.С.* Основы системологии. М.: Радио и связь, 1982. 368 с.
- Шенон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
- Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С.* Макро-экология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти: Кассандра, 2011. 255 с.
- Шитиков В.К., Коппа Ю.В., Курляндский Б.А., Тихонов В.Н.* Прогнозирование токсикологических показателей химических веществ методом самоорганизации моделей // Автоматика. 1986. № 4. С. 85–87.

- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: в 2-х кн. М.: Наука, 2005. Т. 1. 281 с.; Т. 2. 337 с.
- Шупер В.А.* Теория экономического ландшафта на фоне XX столетия // Август Лёш как философ экономического пространства (к столетию со дня рождения). М.: Эслан, 2007. С. 301–312.
- Daily G.C. (ed.)*. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington (DC): Island Press, 1997. 392 p.
- Forrester J.W.* World dynamics. Waltham (MA): Pegasus communications, 1971. 144 p. (рус. пер.: Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 168 с.).
- Gatto M., Muratori S., Rinaldi S.* On the optimality of the logistic growth // J. Optim. Theory Appl. 1988. V. 57. P. 513–517.
- Göke N.* Stop optimizing dumb stuff. Feb 28, 2019. <https://ngoeke.medium.com/stop-optimizing-dumb-stuff-add1d67d9f99>. 14.03.2019.
- Grassland Simulation Model / Ed. G.S. Innis. N. Y. etc.: Springer-Verlag, 1978. 298 p.
- Huber L.* How to streamline every area of your life. Сайт POCKET WORTHY. 2018. <https://medium.com/swlh/how-to-streamline-every-area-of-your-life-4eafac226f16>
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W.* The limits to growth: a report for the club of Rome's project on the predicament of mankind. N. Y.: Universe Books, 1972. 205 p. (рус. пер.: Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс И., Бернс В. Пределы роста. Доклад по проекту Римского клуба "Сложное положение человечества". М.: МГУ, 1991. 206 с.).
- Pickett S.T.A., Kolasa J., Jones C.G.* Ecological understanding: the nature of theory and the theory of nature / 2nd ed. Amsterdam et al.: Academic Press, 2007. 233 p.
- Rozzi R.* The reciprocal links between evolutionary-ecological sciences and environmental ethics // BioScience. 1999. V. 49 (11). P. 911–921.
- Schumacher E.F.* Small is beautiful: a study of economics as if people mattered. L.: Blond & Briggs, Ltd, 1973. 288 p.
- van Dyne G.M.* Ecosystems, systems ecology and systems ecologists. Oak Ridge National Laboratory Report ORNL 3957. Oak Ridge (Tennessee): ORNL, 1966. 31 p.

Environmental Digitalization as a Task of Engineering Environment (Review of the Problem)

G. S. Rozenberg^a, * , N. V. Kostina^a, G. E. Kudinova^a, and A. G. Rozenberg^a

^a*Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences – Branch of the Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Tolyatti, Russia*

*e-mail: genarozenzbrg@yandex.ru

Digitalization (development of the information society) affects all aspects of our life, having an increasingly noticeable (both positive and negative) impact on the environment. Some information technologies in the field of ecology, directions, goals and objectives of digitalization of environmental knowledge and nature management in Russia are discussed.

Keywords: environment, digital technologies, environmental problems, ecosystem, information