

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ INNOVATIVE POTENTIAL FOR ECONOMIC DEVELOPMENT

### Приоритеты использования методов моделирования и исследования адаптации систем энергетики

### Priorities of Using Modeling and Research Methods of Energy Systems Adaptation

DOI: 10.34130/2070-4992-2020-4-65

УДК 338.27:330.42

*С. Л. Садов, Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Федерального исследовательского центра «Кomi научный центр Уральского отделения Российской Академии наук» (Сыктывкар, Россия)*

*S. L. Sadov, The Institute of Socio-Economic and Energetic problems of the North, Federal Research Center «Komi Scientific Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences» (Syktyvkar, Russia)*

*В статье рассматривается проблема использования средств моделирования, изучения и прогнозирования процессов адаптации систем энергетики к меняющимся условиям их развития и функционирования. Основной целью исследования было обоснование выбора инструментария моделирования адаптации, которая помогает преодолевать негативное влияние неопределённости внешней среды. Поставленная задача требует не столько количественных расчётов, сколько качественного анализа основных аспектов адаптации. Это диктуется неопределённостью, с которой описываются её факторы. Поэтому классические методы оптимизации здесь не подходят. Имитационное моделирование тоже требует точности, и, следовательно, не может стать методической основой решения поставленной задачи.*

*В этой связи плодотворно обращение к делению моделей на «жёсткие» и «мягкие» — по сути, водораздел между ними проходит как раз по критерию неопределённости. Жёсткие модели требуют высокой точности исходных данных, чтобы выдавать точный результат. Такие модели необходимы в технике, физике. А мягкие модели допускают работу с качественными оценками, результаты их работы носят также качественный характер. Именно в связи с этим они нашли широкое применение везде, где нет возможности оперировать точными величинами, в т.ч. в экономике. Среди методов, успешно работающих в рамках мягкого моделирования, рассмотрены методы теории нечётких множеств, метод анализа иерархий и метод надмедианных рангов. Особняком стоит теория дифференциальных уравнений — её методы позволяют работать и с жёсткими, и с мягкими моделями. По этой причине она признаётся ведущей методической основой для моделирования адаптации систем энергетики. В дальнейшем этот вывод подтверждается при помощи моделирования выбора методом анализа иерархий. В статье уточняются понятие адаптации для технико-экономических систем, сферы применения жёстких и мягких моделей. Выбранный методический инструментарий понадобится в дальнейших исследованиях развития систем энергетики различного уровня.*

**Ключевые слова:** *системы энергетики, адаптация, неопределённость, качественный анализ дифференциальных уравнений, метод анализа иерархий.*

*The article deals with the problem of using modeling tools, studying and forecasting the processes of adaptation of energy systems to the changing conditions of their development and functioning. The main purpose of the study was to*

*substantiate the choice of adaptation modeling tools, which helps to overcome the negative impact of the uncertainty of the external environment. The task at hand requires not so much quantitative calculations as a qualitative analysis of the main aspects of adaptation. This is dictated by the uncertainty with which its factors are described. Therefore, classical optimization methods are not suitable here. Simulation modeling also requires accuracy, and, therefore, can't become a methodological basis for solving the problem.*

*In this regard, it is fruitful to refer to the division of models into "hard" and "soft" — in fact, the watershed between them resembles just the criterion of uncertainty. Hard models require a high degree of accuracy in the input data to produce accurate results. Such models are needed in engineering and physics. And soft models allow working with qualitative estimates, the results of their work are also of a qualitative character. In this connection they have found wide application wherever it is impossible to operate with exact values, including in economics. Among the methods that successfully work in the soft modeling, methods of the fuzzy sets theory, the analytical hierarchy process and the supramedian ranks method are considered. The theory of differential equations stands apart — its methods allow working with both hard and soft models. For this reason, it is recognized as the leading methodological framework for modeling the adaptation of energy systems. This conclusion is further confirmed by modeling the choice by the analytical hierarchy process. The article clarifies the concept of adaptation for technical and economic systems, the scope of application of hard and soft models. The selected methodological toolkit will be needed in further studies of the energy systems development at various levels.*

**Keywords:** *energy systems, adaptation, uncertainty, qualitative analysis of differential equations, analytical hierarchy process.*

## Введение

Проблема эволюции социально-экономических систем, которые находятся под влиянием меняющегося окружения и объективно вынуждены адаптироваться к нему, уже долгое время привлекает внимание исследователей [1]. Системы энергетики не являются исключением. Но, имея свои отличительные особенности, они предъявляют к методам исследования их адаптации при изменении внешних условий функционирования и развития специфические требования [2]. С другой стороны, неопределённость информации о параметрах систем, их структуры многообразна в своих проявлениях и в своём влиянии на результативность математического моделирования процессов их функционирования и развития. Она обнаруживает себя в различных формах: начиная от погрешностей при определении численных значений параметров или характеристик объектов (систем) до полной неясности с наличием каких-либо важных свойств, черт или особенностей последних [3]. Для нивелирования отрицательных последствий неопределённости в математике разработано немало процедур и методов, среди которых в качестве универсальных следует отметить использование теорий нечётких множеств и качественного анализа дифференциальных уравнений (и их систем), методов анализа иерархий и надмедианных рангов. Системный подход в энергетических исследованиях должен учитывать имманентно присущую системам энергетики неопределённость развития и функционирования, применять методы, адекватные уровню последней, позволять проводить цикл исследований, охватывающий разработку, оценку и выбор вариантов динамики их систем в увязке с изменяющимся окружением энергетики. Выявление этих требований и определение методов, в наибольшей степени отвечающих им, составляет содержание данной статьи.

## Методология исследования

При решении поставленной задачи, связанной с исследованием и анализом социально-экономических систем, целесообразно обратиться к опыту моделирования сложных систем в других науках. Такой опыт имеется у физики и биологии, объектами исследования которых являются сложные системы.

Так, в поведении физических и социально-экономических систем отчётливо прослеживаются черты сходства. К примеру, с точки зрения термодинамики реальный рынок является неравновесной открытой системой, обладающей многими степенями свободы [4], и в ней огромную, зачастую решающую роль играют случайные (стохастические) процессы. И в связи с данным обстоятельством рынок подобен предметам изучения термодинамики и статистической физики. Именно по причинам невозможности учёта всего многообразия участвующих в процессе элементов системы и их поведения, физики используют такие обобщающие характеристики систем, как температура, давление, энергия, которые в большинстве своём поддаются измерению. Не удивительно, что попытки термодинамического описания экономических систем предпринимаются уже более ста лет. Это направление привело к созданию эконофизики (термин введён в научный оборот Р. Мантенья и Г. Стенли в 2000 г.). Если в физических

системах происходит обмен энергией, теплотой, то в экономических системах, по аналогии, имеет место обмен информацией, ресурсами и, вообще говоря, любыми факторами производства. Можно согласиться с тем, что «...важным результатом эволюции эконофизических представлений должна стать интеграция подходов физики и экономики к трактовке энергии и информации как базовых научных понятий. Взаимодействие энергии и информации проявляется при формировании динамических характеристик и самоорганизации экономической системы. Поэтому к двум темам диалога между экономикой и эконофизикой — применение методов статистической физики и использование моделей квантовой механики — должна быть добавлена третья и главная — энергетическая и информационная характеристики экономической системы и их учёт в процессе выработки макроэкономической политики» [5]. В последние десятилетия происходит развитие данного направления. За счёт охвата агрегированных компонент материальной основы цивилизации (массы, энергии, информации) и характера их взаимодействия на современном этапе биофизическая экономическая теория изучает возможности обмена их потоками для достижения устойчивого роста [6]. Фактор адаптации играет в этих процессах одну из важнейших ролей.

Ведущим направлением в эконофизике до сих пор является изучение финансового рынка. Здесь эконофизики развили подходы, заложенные В. Парето в 1897 г. и актуализированные Б. Мандельбротом в 1963 г. Сыграл роль интерес к обширным базам данных по биржевым котировкам, накопленным за десятилетия, на которых можно было опробовать различные подходы по работе с большими массивами информации, отработать новые методы выявления внутренних взаимосвязей экономических систем. Но, следуя физическим аналогам, приходилось вводить допущение о постоянстве количества акций, обращающихся на бирже. Это делало термодинамические финансовые модели малореалистичными и в конечном счёте непродуктивными для практического применения. Так что хотя, в определённых случаях, как заметил А. А. Петров, «...возникают ассоциации со статистической физикой, однако в экономике ситуация сложнее, потому что ансамбль состоит из "частиц" многих типов и намного сложнее взаимодействия "частиц"» [7]. И, как вывод: «Экономические системы принципиально отличаются от физических, поэтому к опыту математического моделирования в естественных науках нельзя относиться как к набору приёмов. Его надо воспринимать скорее как идеологию». Можно добавить к этому, что арсенал методов физики необходимо соразмерять со сложностью моделируемой системы, следить за принимаемыми (иногда неосознанно) допущениями, чтобы они не выхолостили сам процесс моделирования и получаемые результаты. Следует отметить, что отмеченные факторы (сложность системы и влияние принятых допущений) усложняют процесс моделирования ещё и потому, что трудно поддаются формализации и не позволяют провести чёткую границу допустимого. И опять-таки нельзя забывать о уровне неопределённости, в условиях которой происходит моделирование.

А. А. Петров указал на ещё одно принципиальное отличие экономических систем от физических: «С физическими системами можно экспериментировать и быть уверенным, что каждый раз эксперимент проводится с той же самой системой. Поэтому результаты экспериментов статистически достоверны. Экономическая система в каждый момент времени существует в единственном экземпляре, поэтому нельзя быть уверенным, что повторные эксперименты проводятся с той же самой системой» [7].

Указанные и иные различия приводят к использованию различных типов моделей. Физические модели, информация для которых должна иметь высокую точность и достоверность, называют «жесткими». Модели социально-экономических процессов неизбежно строятся в условиях повышенной неопределённости и поэтому используют методы, не требующие высокой точности — их относят к «мягким» [8]. При этих различиях есть и сходство типов — в любом случае модель отражает лишь наиболее важные для решения поставленной задачи черты моделируемой системы, её внутренние и внешние связи и отношения, а остальные оставляет без рассмотрения. Различия так же проявляются и в целях проводимых вычислительных экспериментов: «Как правило, в физике вычислительный эксперимент проводится, чтобы уточнить структуру уравнений и вывести из них содержательные следствия. В экономике же вычислительный эксперимент проводится для проверки исходных гипотез и вывода из них основных уравнений. Вычислительные эксперименты с моделями экономических систем дают исходный экспериментальный материал для индуктивного процесса вывода общих принципов» [7]. Ещё один результат из практического опыта моделирования — исследователь лучше и полнее воспринимает результаты вычислительных экспериментов, легче находит их интерпретацию при графической визуализации итогов расчётов по модели.

Перечисленные сложности с моделированием сложных технических и априори ещё более сложных социально-экономических систем во второй половине XX века побудили исследователей обратиться к

опыту изучения биологии живых организмов, а именно к такому их свойству, как умению адаптироваться (изменяться, подстраиваться) к изменениям окружающей среды (как на индивидуальном уровне, так и видовом). С этой точки зрения эволюция предстаёт как результат цепочки актов адаптации, закрепляемых в ходе естественного отбора. Выживали и развивались те виды, кто успешнее, «точнее» адаптировался. Данный подход оказался применим и к социально-экономическим системам, находящимся в изменчивой и конкурентной среде [2; 9].

Заимствование понятия адаптации для использования в исследованиях технико-экономического профиля (куда относится и энергетика) требует его уточнения и корректировки [1]. На первый план здесь выходит способность системы как минимум сохранять работоспособность при изменении параметров окружения или внутренних параметров, а как максимум — функционировать в режиме, близком к оптимальному. К тому же, в отличие от природы, в технико-экономических системах адаптация не стихийная, а сознательно формируемая, рукотворная. В природе преобладает пассивная адаптация (когда происходит приспособление к фиксированной на определённый момент времени среде), а в системах с участием человека — активная, при которой имеет место поиск среды, наиболее адекватной системе [2]. Конечно, свои нюансы вносит и скорость изменений, — при медленных трансформациях среды адаптация происходит тоже в неспешном режиме и система имеет больше шансов на успешное приспособление. При слишком быстрых переменах она рискует «пойти вразнос» с негативными последствиями вплоть до катастрофических. В ходе исследований такую опасность можно распознать при помощи дифференциальных уравнений, что подтверждает высокую востребованность их теории при моделировании и анализе процессов адаптации. Понятие адаптации созвучно понятию устойчивости в том смысле, что система функционирует и сохраняет свою работоспособность в условиях изменчивости внешней среды и нарушений внутренних процессов и взаимосвязей. А свойство устойчивости — одно из фундаментальных в теории дифференциальных уравнений, хорошо моделируется и исследуется с её помощью.

Также стоит обратить внимание на созвучность понятий адаптации и выживания — для биологических систем и живучести — для технических. Понятия выживания и живучести требуют выявления предельных, критических значений параметров систем, чем также успешно занимается теория дифференциальных уравнений. И это обстоятельство лишний раз подчёркивает её высокую значимость при моделировании и исследовании процессов адаптации.

Невзирая на сложность теории дифференциальных уравнений и сложность её методов, она находит всё более широкое применение при решении задач как чисто экономической, так и социально-экономической проблематики [10], в том числе плохо формализуемых. В последнем случае речь, конечно, идёт о качественной теории дифференциальных уравнений, которой подвластны решения задач из области экологии, экономики, медицины и пр. [11].

Если суммировать приведённые выше доводы о пользе применения тех или иных методов при исследовании возможностей и путей достижения адаптации систем энергетики, то получается следующая картина. Принимая во внимание двойственную природу систем энергетики как, с одной стороны, технических, а с другой — социально-экономических, невозможно сделать однозначный выбор в пользу жесткого или мягкого моделирования. Необходимо их сочетание для анализа разных аспектов деятельности систем энергетики и их последствий. Из математических методов лишь теория дифференциальных уравнений допускает моделирование двух типов. С учётом описанных выше возможностей этой теории её инструментарий следует признать ведущим для решения поставленной задачи. Остальные методы будут полезны для расширения области применения мягкого моделирования в системных исследованиях энергетики, особенно социально-экономических аспектов последней.

Чтобы более объективно оценить значимость различных методов, полезно прибегнуть к применению такого способа агрегирования экспертных оценок качественного характера, как метод анализа иерархий (МАИ). Он зарекомендовал себя как эффективный математический инструмент, использующий в качестве исходной информации экономические и иные показатели, которые не являются результатом точных замеров, а основаны на экспертных суждениях и оценках [12]. Данный метод нашёл применение во многих областях — экономике, энергетике [13], технике [14], информационных технологиях [15] и т. д. И поскольку для многих задач экономики и управления, связанных с отношениями между людьми, нет возможности оперировать чётко определёнными результатами численных измерений, то МАИ в такой ситуации даёт исследователям возможность получать устойчивые и соответствующие реалиям результаты, имея в качестве исходной информации

сравнительные экспертные оценки качественного характера [16], получаемые, как правило, при парном сравнении факторов и показателей [17].

Метод анализа иерархий позволяет ответить на поставленный в статье вопрос о предпочтительности использования вышеуказанных методов на основе экспертных оценок. Для работы по МАИ первым делом необходимо построить иерархию задачи, желательно полную [12]. Иерархия позволяет представить исходную трудноразрешимую задачу как композицию простых подзадач и получить решение как своего рода свёртку качественных оценок, полученных при парных сравнениях, по 9-балльной шкале (о ней будет сказано далее). Математически это достигается перемножением обратносимметричных матриц парных оценок.

Нижний уровень иерархии образуют оцениваемые математические методы (рис. 1). Это методы теории нечётких множеств (ТНМ), метод анализа иерархий (МАИ), метод надмедианных рангов (МНР) и методы качественной теории дифференциальных уравнений (КТДУ).



**Рис. 1. Полная иерархия для решения задачи определения значимости методов моделирования адаптации систем энергетики**

На втором уровне иерархии находятся факторы, влияющие на эффективность и полезность применения методов для моделирования и исследования процессов адаптации систем энергетики. Рассмотрим их.

«Возможности моделирования систем энергетики» характеризуют понятийный аппарат метода, тип используемых в нём переменных и то, насколько полно и адекватно позволяют они описать ситуации, возникающие при моделировании систем энергетики, их развития и функционирования.

«Требования к исходной информации» подразумевают, во-первых, количественный или качественный характер должны иметь исходные данные и каковы в первом случае требования к точности или допустимой погрешности, а во втором — сколько градаций должно быть, чтобы метод дал осмысленный, содержательный результат.

Фактор «Интерпретируемость результатов расчётов по моделям» отчасти связан с предыдущим, но характеризует в целом пригодность результатов моделирования и расчётов по методу для выработки имеющих практическую направленность, конкретность результатов.

«Простота работы с методом» — немаловажное обстоятельство получения полезных результатов при работе по методу, понимание смысла и содержания совершаемых операций и процедур, возможность

обнаружения ошибок в исходных данных или при построении модели и, что тоже важно, минимизация затрат времени на полный цикл исследований.

«Проработанность метода» можно соотнести с развитостью связанной с ним математической дисциплины, с некоторой долей условности — с числом её разработчиков и количеством работ по ней.

После построения иерархии требуется произвести попарное оценивание факторов и методов и записать полученные оценки в виде обратносимметричных матриц. Для заполнения этих матриц используется 9-балльная шкала сравнений [12]. Например, для факторов А и В:

9 баллов означает, что фактор А по значимости абсолютно превосходит фактор В;

7 — что А явно важнее В;

5 — А значительно важнее В;

3 — А незначительно важнее В;

1 — А и В одинаково важны.

Чётные баллы 8, 6, 4 и 2 выражают промежуточные градации оценок.

Необходимым требованием при использовании метода анализа иерархий является соблюдение транзитивности и хорошие показатели согласованности исходных данных в матрицах парных сравнений. Если эти требования нарушаются, то следует воспользоваться приёмами, изложенными в работах Т. Саати по этим вопросам [18; 19]. Как показано в работе [20], выполнение достаточно простой процедуры предварительного ранжирования позволяет избежать нарушения транзитивности и удержать показатели согласованности матриц попарных сравнений в требуемых в МАИ пределах.

### Результаты исследования

Итак, исходными данными для решения поставленной задачи определения значимости математических методов моделирования и анализа процессов адаптации систем энергетики с помощью МАИ будут заполненные попарными оценками обратносимметричная матрица 5×5 для значимости методов и пять матриц 4×4 для каждого из методов. Относительный вес отраслей и прочие промежуточные показатели будут оцениваться по 9-балльной шкале, применяемой в МАИ. Все факторы оцениваются экспертно, поскольку для них нельзя указать количественные показатели, имеющие верифицированную связь с ними.

Для заполнения матрицы попарных сравнений факторов для определения значимости методов, следуя процедуре предварительного ранжирования, проранжированный ряд из пяти означенных на рис. 1 факторов второго уровня иерархии (шаг 1 процедуры подготовки исходных данных) выглядит следующим образом: исходная информация — проработанность теории метода — интерпретация результатов — возможности описания систем энергетики — простота работы с методом. Тогда матрица попарных сравнений приобретает вид (по строкам и столбцам в ней располагаются факторы в порядке, обозначенном на рис. 1):

1	1/4	1/2	2	1/3
4	1	3	5	2
2	1/3	1	3	1/2
1/2	1/5	1/3	1	1/4
3	1/2	2	4	1

Нормализованный собственный вектор данной матрицы, соответствующий её наибольшему собственному числу, есть [0.097, 0.417, 0.160, 0.063, 0.263], отношение согласованности (ОС) равно 0.015, что существенно меньше 0.1 — допустимой верхней границы значений ОС [12].

Зависимость факторов и методов выражаются в виде матриц (во всех матрицах строки и столбцы соответствуют методам):

• для первого фактора — возможностей описания систем энергетики — ранжированный ряд выглядит так: КТДУ — МАИ — ТНМ — МНР, а матрица –

1	1/5	1	1/6
5	1	5	1/3
1	1/5	1	1/6
6	3	6	1

у этой матрицы собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному числу, есть  $[0.074, 0.294, 0.074, 0.558]$ , а отношение согласованности для неё  $OC=0,039$ ;

• для требований методов к исходной информации ранжированный ряд таков: МНР — ТНМ — МАИ — КТДУ; матрица же имеет вид:

1	3	1/3	6
1/3	1	1/5	4
3	5	1	8
1/6	1/4	1/8	1

с нормализованным собственным вектором  $[0.267, 0.123, 0.565, 0.046]$ ,  $OC=0,054$ ;

• для возможностей интерпретации результатов расчётов по моделям ранжированный ряд таков: КТДУ — МАИ — ТНМ — МНР, а матрица —

1	1/3	2	1/7
3	1	3	1/5
1/2	1/3	1	1/8
7	5	8	1

с нормализованным собственным вектором  $[0.090, 0.187, 0.061, 0.661]$ ,  $OC=0,041$ ;

• для фактора простоты работы по методу ранжированный ряд имеет вид: МНР — МАИ — ТНМ — КТДУ; матрица —

1	1/3	1/5	4
3	1	1/3	6
5	3	1	8
1/4	1/6	1/8	1

с нормализованным собственным вектором  $[0.123, 0.267, 0.565, 0.046]$ ,  $OC=0,054$ ;

• и наконец, для теоретической проработанности метода ранжирование даст ряд КТДУ — ТНМ — МАИ — МНР, а матрица примет вид:

1	1	3	1/5
1	1	3	1/5
1/3	1/3	1	1/7
5	5	7	1

с нормализованным собственным вектором  $[0.153, 0.153, 0.062, 0.632]$ ,  $OC=0,027$ .

Что касается качества исходной информации, то требование транзитивности соблюдается для всех пяти матриц, а показатель отношения согласованности находится в хорошем диапазоне от 0.03 до 0.06, что говорит о достаточно высоком качестве исходных данных. После умножения справа матрицы  $4 \times 5$ , состоящей из столбцов нормализованных собственных векторов всех пяти матриц факторов, на нормализованный собственный вектор матрицы значимости методов, получим вектор, компонентами которого являются веса (численные показатели относительной значимости) четырёх оцениваемых методов, образующих нижний уровень иерархии (рис. 1) —  $[0.181, 0.167, 0.304, 0.349]$ .

### Заключение

Главный результат работы — разработанный метод определения значимости математических методов для моделирования и исследования адаптации систем энергетики. Он необходим на исследовательском этапе оценки перспектив развития энергетики, её отдельных отраслей и систем различных масштабов (уровней). Авторские оценки попарных сравнений факторов и методов позволили прийти к следующим выводам. Наиболее значимым из методов, как и следовало из предварительного анализа, признаны методы качественной теории дифференциальных уравнений (34.9 %). Вместе с методом надмедианных рангов (30.4 %) они представляют собой инструментарий с достаточно широкими возможностями решения поставленной задачи. Оставшиеся методы — метод анализа

иерархий (16.7 %) и методы, основанные на нечёткости (18.1 %), — могут пригодиться при рассмотрении отдельных аспектов адаптации систем энергетики, соответствующих специфике этих методов. Выбранный методический инструментарий понадобится в дальнейших исследованиях аналитического и прогнозного характера систем энергетики различного уровня — муниципального, регионального или в масштабах стран, в т.ч. с возможностью выделения отдельных отраслей.

### Список литературы

1. Гречко М. В. Адаптация как основа эволюции экономических систем // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 17 (302). С. 13-23.
2. Растрин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
3. Davidson L. Uncertainty in Economics // Encyclopedia of Statistical Sciences. Vol. 2. By S. Katz, C. B. Read and D. L. Banks (eds). (New York: Wiley 1998).
4. Цирлин А. М. Оптимизационная термодинамика экономических систем. М.: Научный мир, 2011. 200 с.
5. Бурлачков В. Экономическая наука и экономическая физика. URL: <https://institutiones.com/general/266-2008-06-18-13-45-41.html> (дата обращения: 10.10.2020).
6. Yan J., Feng L., Steblyanskaya A., Kleiner G. and Rybachuk M. Biophysical Economics as a New Economic Paradigm // International journal of public administration. Published online: 03 Sep 2019. URL: <https://doi.org/10.1080/01900692.2019.1645691> (дата обращения: 10.10.2020).
7. Петров А. А. Математическое моделирование экономических систем // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 3. С. 1-28.
8. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2004. 32 с.
9. Теванян А. М. Адаптация экономических систем к стрессовым нагрузкам посредством управления интеллектуальным капиталом // Креативная экономика. 2017. Т. 11. № 11. С. 1133-1144.
10. Гордеева Т. Н. Применение «универсальных» математических моделей в исследовании процессов муниципальных образований // Современные исследования социальных проблем. 2017. Т. 8. № 6. С. 134-149. DOI: 10.12731/2218-7405-2017-6-134-149.
11. Эрроусмит Д., Плейс К. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями : пер. с англ. М.: Мир, 1986. 243 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
13. Зайченко И. М., Гутман С. С. Применение метода анализа иерархий для выбора стратегического приоритета энергетического развития районов Крайнего Севера // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23. № 7. С. 114-123.
14. Saracoglu B. O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries // European Journal of Industrial Engineering. 2013. 7 (4), pp. 416-441. DOI: 10.1504/EJIE.2013.055016.
15. Кузькин А. А. Методика обеспечения устойчивости стратегии развития информационных технологий в организации // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. № 6(37). С. 95-115.
16. Saaty T. L., Vargas L. G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Boston: Kluwer Academic, 2001. pp. 345. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
17. Saaty T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors // The Analytic Hierarchy/Network Process. Review of the Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Series A: Mathematics (RACSAM). June 2008. 102 (2), pp. 251-318. DOI: 10.1007/bf03191825.
18. Saaty T. L. Mathematical Principles of Decision Making: Comprehensive coverage of the AHP, its successor the ANP, and further developments of their underlying concepts. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. 2009.
19. Saaty T. L. On the Measurement of Intangibles. A Principal Eigenvector Approach to Relative Measurement Derived from Paired Comparisons // Notices of the American Mathematical Society, February 2013. 60(2), pp. 192-208. doi: 10.1090/noti944.
20. Sadov S. L. Finding the potential contribution of the fuel and energy sectors to increase the energy efficiency of the economy // Corporate Governance and Innovative Economic Development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Capital of Syktyvkar State University. 2019. № 4. С. 92-98. DOI: 10.34130/2070-4992-2019-4-92-98.

### References

1. Grechko M. V. Adaptation as the basis for the evolution of economic systems. *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'* [National interests: priorities and security], 2015, No. 17 (302), pp. 13-23. (In Russian).
2. Rastrigin L. A. *Adaptatsiya slozhnyh sistem* [Adaptation of complex systems]. Riga: Zinatne, 1981. pp. 375. (In Russian).
3. Davidson L., 1998. Uncertainty in Economics. *Encyclopedia of Statistical Sciences. Vol. 2. By S. Katz, C. B. Read and D. L. Banks (eds).* (New York: Wiley).



4. Cirlin A. M. *Optimizatsionnaya termodinamika ekonomicheskikh sistem* [Optimization thermodynamics of economic systems]. Moscow: Scientific world, 2011. pp. 200. (In Russian).
5. Burlachkov V. *Ekonomicheskaya nauka i ekonofizika* [Economics and econophysics]. Available at: <https://institutiones.com/general/266-2008-06-18-13-45-41.html> (Accessed 10.10.2020). (In Russian).
6. Yan J., Feng L., Steblyanskaya A., Kleiner G., Rybachuk M., 2019. Biophysical Economics as a New Economic Paradigm. *International journal of public administration*. Published online: 03 Sep 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/01900692.2019.1645691>.
7. Petrov A. A. Mathematical modeling of economic systems. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 1989, vol. 1, № 3. pp. 1-28. (In Russian).
8. Arnold V. I. «Zhestkie» i «myagkie» matematicheskie modeli ["Hard" and "soft" mathematical models]. Moscow: Moscow center for continuous mathematical education, 2004. pp. 32. (In Russian).
9. Tevanyan A. M. Adaptation of economic systems to stress loads through intellectual capital management. *Kreativnaya ekonomika* [Creative economy], 2017, vol. 11, No. 11, pp. 1133-1144. (In Russian).
10. Gordeeva T. N. The using of "universal" mathematical models in the study of the processes of municipalities. *Sovremennye issledovaniya social'nyh problem* [Modern research of social problems], 2017, Vol. 8, No. 6. pp. 134-149. DOI: 10.12731/2218-7405-2017-6-134-149 (In Russian).
11. Errousmit D., Plejs K. *Obyknoennyye differentsial'nye uravneniya. Kachestvennaya teoriya s prilozheniyami* [Ordinary differential equation. Qualitative Theory with Applications: Trans. from eng.]. Moscow: Mir, 1986. pp. 243. (In Russian).
12. Saati T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij / per. s angl. R.G. Vachnadze* [Making decisions. Analytical Hierarchy Process. Trans. from English by R.G. Vachnadze]. Moscow: Radio and communication, 1993. pp. 278. (In Russian).
13. Zajchenko I. M., Gutman S. S. Application of the Analytical Hierarchy Process to select the strategic priority of energy development in the Far North. *Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikalian State University], 2017, vol. 23, no. 7, pp. 114–123. (In Russian).
14. Saracoglu B. O., 2013. Selecting industrial investment locations in master plans of countries. *European Journal of Industrial Engineering*. 7 (4): pp. 416–441. DOI: 10.1504/EJIE.2013.055016.
15. Kuz'kin A. A. Methodology for the sustainability ensuring of the development strategy of information technology in the organization. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2014, Issue 6(37), pp. 95–115. (In Russian).
16. Saaty T. L., Vargas L.G., 2001. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston: Kluwer Academic, pp. 345. DOI: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
17. Saaty T. L., 2008. "Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors — The Analytic Hierarchy/Network Process". *Review of the Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Series A: Mathematics (RACSAM)*. 102 (2), pp. 251–318. DOI: 10.1007/bf03191825.
18. Saaty T. L., 2009. *Mathematical Principles of Decision Making: Comprehensive coverage of the AHP, its successor the ANP, and further developments of their underlying concepts*. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications.
19. Saaty T. L., 2013. On the Measurement of Intangibles. A Principal Eigenvector Approach to Relative Measurement Derived from Paired Comparisons. *Notices of the American Mathematical Society*, 60(2): pp. 192–208. DOI: 10.1090/noti944.
20. Sadov S. L. Finding the potential contribution of the fuel and energy sectors to increase the energy efficiency of the economy. *Corporate Governance and Innovative Economic Development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Capital of Syktyvkar State University*, 2019, No. 4, pp. 92–98. DOI: 10.34130/2070-4992-2019-4-92-98.

---

**Для цитирования:** Садов С. Л. Приоритеты использования методов моделирования и исследования адаптации систем энергетики // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2020. № 4. С. 65–73. DOI: 10.34130/2070-4992-2020-4-65

**For citation:** Sadov S. L. Priorities of using modeling and research methods of energy systems adaptation // Corporate Governance and Innovative Economic Development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Investment of Syktyvkar State University. 2020. No. 4. P. 65–73. DOI: 10.34130/2070-4992-2020-4-65