

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ТРУДНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
v.a.zelentsov@gmail.com*

Аннотация. Разработан метод формирования интегральной оценки качества трудноформализуемых объектов на примере анализа устойчивости лесных экосистем. Предлагаемый метод основан на процедурах многокритериального анализа и квалиметрии моделей и полимодельных комплексов. Используется двухуровневая классификация показателей устойчивости, включающая совокупность частных и обобщенных показателей. Интегральная оценка устойчивости формируется на базе значений обобщенных показателей. Рассматривается наиболее общий случай, когда рассматриваемые показатели имеют сложную структуру, измеряются в различных шкалах (количественных и качественных) и могут быть нелинейно связаны друг с другом. Описание метода проводится на примере получения интегральной оценки устойчивости при использовании трех обобщенных показателей, описывающих продуктивную способность, санитарное состояние, биоразнообразие лесов. Каждый из обобщенных показателей представляет собой лингвистическую переменную. Суть метода состоит в применении продукционных моделей предпочтения лица, принимающего решения, и обработки данных экспертного опроса методами теории нечетких мер. Использование метода позволяет описать и учесть нелинейное влияние совокупности обобщенных показателей на результирующую оценку устойчивости и за счет этого получить наиболее достоверные результаты. На основе предложенного метода можно получить оценки интегральной устойчивости, провести сравнительный анализ участков леса с различными значениями частных показателей, а также устойчивости одного и того же участка в разные моменты времени.

Ключевые слова: *трудноформализуемые объекты, многокритериальный анализ, интегральная оценка, устойчивость, лесные экосистемы, лингвистическая шкала, продукционные модели, экспертный опрос*

Благодарности: исследования по разделу „Метод решения“ выполнены в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004; исследования по разделу „Многокритериальный анализ устойчивости лесной экосистемы“ выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>).

Ссылка для цитирования: *Зеленцов В. А. Метод формирования интегральной оценки качества трудноформализуемых объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 122—132. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-122-132.*

METHOD FOR CREATING AN INTEGRAL ASSESSMENT OF THE QUALITY
OF DIFFICULT-TO-FORMALIZE OBJECT

V. A. Zelentsov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
v.a.zelentsov@gmail.com*

Abstract. A method for creating an integral assessment of the quality of difficult-to-formalize object is developed using the example of analysis of forest ecosystem sustainability. The proposed method is based on the procedures of multicriteria analysis and qualimetry of models and multi-model complexes. A two-level classification of sustainability indicators is used, including a set of specific and general indicators. An integral assessment of sustainability is created on the

basis of the values of generalized indicators. The most general case is analyzed when the indicators under consideration have a complex structure, are measured in various scales (quantitative and qualitative) and can be related non-linearly to each other. The method description is carried out using the example of deriving an integral assessment of sustainability on the basis of three generalized indicators characterizing the productive capacity, sanitary condition, and biodiversity of forests. Each of the generalized indicators represents a linguistic variable. The essence of the method is the application of production models of preference of the decision maker and processing of expert survey data by the methods of the theory of fuzzy measures. Using the method allows to describe and take into account the nonlinear influence of a set of generalized indicators on the resulting assessment of stability and thereby obtain the most reliable results. Based on the proposed method, it is possible to obtain estimates of the forest integral sustainability, to conduct a comparative analysis of forest vegetation sites with different values of generalized indicators, as well as for the same site at different points in time.

Keywords: difficult-to-formalize object, multicriteria analysis, integral assessment, sustainability, forest ecosystem, linguistic scales, production models, expert survey

Acknowledgments: Research in the section “Solution method” was carried out within the framework of the budget topic FFZF-2022-0004; Research in the section “Multi-criteria analysis of the sustainability of a forest ecosystem” was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>).

For citation: Zelentsov V. A. Method for creating an integral assessment of the quality of difficult-to-formalize object. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 122—132 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-122-132.

Введение. Одно из актуальных направлений развития методов системного анализа — разработка способов моделирования процессов функционирования и оценивания качества сложных трудноформализуемых объектов и систем, к которым относятся многие социотехнические, экономические, а также природные объекты и системы. В частности, характерным примером трудноформализуемой задачи является получение интегральной оценки устойчивости лесных экосистем (в настоящей статье термин „лесная экосистема“ используется в узком смысле, в значении „совокупность лесной растительности на заданном участке территории“). Этой задаче присущи такие признаки, как наличие многих показателей, нелинейно связанных друг с другом, применение различных шкал для разных показателей (как количественных, так и качественных), иерархическая структура показателей. Метод решения данной задачи может иметь достаточно общий характер, он применим и для других типов трудноформализуемых объектов.

Необходимо отметить, что задача оценки устойчивости лесных экосистем находится в центре внимания российских и зарубежных исследователей в области лесопользования, экологии, прикладных информационных технологий и обработки данных в течение последних нескольких десятилетий. Результаты оценивания устойчивости служат основой для принятия решений по управлению лесопользованием, планированию развития территорий, экологической безопасности, и имеют глобальное значение для анализа природной среды в целом в связи с высокой важностью функций, выполняемых лесами и усилением антропогенного давления на лесные экосистемы.

В настоящее время активно проводятся исследования, посвященные различным аспектам анализа показателей устойчивости лесных экосистем и созданию моделей для их оценивания. Подходы к оцениванию устойчивости базируются на общих положениях теории устойчивости геосистем и описанных механизмах устойчивости различных природных компонентов [1—3]. При этом в современной литературе приводится достаточно большое количество определений понятия устойчивости. Применительно к лесным экосистемам чаще всего под устойчивостью понимается их способность сохранять (в определенных пределах) структуру и характер функционирования в пространстве и во времени при изменяющихся условиях среды, в том числе под влиянием антропогенных факторов [4—7]. Именно в таком контексте будет использоваться понятие „устойчивость“ в настоящей работе.

При всем терминологическом многообразии, связанном с понятием устойчивости, в материалах российских и зарубежных исследователей подчеркивается тот факт, что для оценивания устойчивости лесных экосистем необходимо использовать множество частных показателей (как количественных, так и качественных) и соответственно — разнотипных моделей функционирования лесных насаждений [7—12]. Используются такие частные показатели, как скорость роста, продуктивность и плотность древостоя, видовое разнообразие, повреждения растительности и др. [7, 13, 14]. Для расчета показателей устойчивости используются различные модели функционирования лесной растительности, каждая из которых может применяться для оценивания своего показателя устойчивости или их совокупности [8—11, 15].

При формировании общего взгляда на устойчивость лесной экосистемы и проведении сравнительного анализа отдельные частные показатели обычно группируются для последующего оценивания обобщенных показателей устойчивости по каждому анализируемому направлению. Далее по результатам оценивания обобщенных показателей может быть сформирована интегральная (результатирующая) оценка устойчивости лесной экосистемы.

Наиболее общий состав направлений оценивания и соответствующих им обобщенных показателей устойчивости, применяемых в международной практике, включает в себя продуктивную способность лесов; влияние антропогенных факторов и жизнеспособность лесов; питательный и водный режим почв и древесных растений; защитную функцию лесов; сохранение и поддержание биологического разнообразия лесов, углеродный цикл; социально-экономическую функцию лесов [16]. В Российской Федерации в настоящее время руководствуются нормативным документом, представляющим критерии и индикаторы устойчивого управления лесами [17]. Документ также предполагает использование комплекса показателей для оценивания устойчивости лесной экосистемы. Состав применяемых обобщенных и частных показателей в России в целом скоординирован с международным подходом.

Отметим, что используемые здесь термины „обобщенный показатель“ и „частный показатель“ соответствуют по смыслу применяемым в зарубежных, а иногда и отечественных, публикациях терминам „критерий“ и „индикатор“, но более — устоявшейся отечественной терминологии в области многокритериального анализа и принятия решений [18].

Необходимо также отметить, что вопросы устойчивости лесных экосистем, как правило, рассматриваются в контексте задач управления, а именно — устойчивого управления. Поскольку многокритериальная оценка устойчивости (задача анализа) является составной частью задачи управления (задачи синтеза) и ее первым этапом, представляется правомерным использование подходов к определению состава частных и обобщенных показателей, принятых при исследовании задач управления лесными экосистемами, для формирования оценок устойчивости по частным, обобщенным и интегральным показателям.

Существующая иерархия [16, 17] показателей обуславливает целесообразность двухуровневого подхода к получению интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы, при котором на первом (нижнем) уровне на основе анализа значений групп частных показателей формируются оценки по соответствующим обобщенным показателям, на втором (верхнем уровне) может быть выведена интегральная оценка на базе оценок по всем обобщенным показателям или их части — в зависимости от целей исследования.

В настоящей статье исследуется способ решения задачи верхнего уровня, т.е. получение интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы на базе оценивания по общепринятым и перечисленным выше обобщенным показателям. Причем рассматривается наиболее общий случай, когда показатели устойчивости имеют сложную структуру, измеряются в различных шкалах (количественных и качественных) и могут быть нелинейно связаны друг с другом.

К настоящему времени устоявшихся подходов к получению интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы на базе единого комплексного показателя не существует. Вместе с тем в ряде работ (например, [4, 10]) показано, что функционирование и развитие лесных экосистем базируется на общих системно-кибернетических закономерностях. Это от-

крывает возможности для применения методов, разработанных в системно-кибернетической области знаний, для задач анализа лесных экосистем. Такие возможности продемонстрированы целым рядом исследователей (см. например, [4, 10]). В частности, для разрешения неопределенности, связанной с многокритериальностью в задачах оценивания устойчивости лесных экосистем, представляется перспективным развивать и адаптировать результаты, полученные в таких современных направлениях системно-кибернетической отрасли, как теория управления структурной динамикой сложных систем [19] и квалиметрия моделей и полимодельных комплексов [18].

Многокритериальный анализ устойчивости лесной экосистемы. Характеризуя проблему многокритериального анализа устойчивости лесной экосистемы, следует отметить, что в настоящее время существует большое разнообразие подходов к решению подобных задач для сложных систем различного класса. К ним можно отнести подходы к преодолению критериальной неопределенности, основанные на количественных измерениях [20—22]; методы, основанные на первичных качественных измерениях, результаты которых сразу переводятся в количественный вид [23, 24]; методы, основанные на количественных измерениях, но использующие несколько индикаторов при сравнении альтернатив [25, 26]; методы вербального анализа, основанные на качественных измерениях без какого-либо перехода к количественным переменным [27].

Часто для решения задач многокритериального анализа и выбора выполняют скаляризацию обобщенного векторного показателя путем формирования сверток различного вида [20, 28]. Использование сверток обусловлены и основные недостатки данных методов в случае их применения для оценивания устойчивости лесной экосистемы, а именно:

— определение используемых в свертках весовых коэффициентов отдельных показателей сопряжено с серьезными трудностями получения и обработки экспертной информации, в результате весовые коэффициенты слабо связаны с действительной ролью отдельных показателей при оценке интегрального показателя;

— не учитывается нелинейный характер влияния показателей друг на друга и на интегральный показатель устойчивости лесной экосистемы.

При многокритериальном оценивании устойчивости лесной экосистемы используемые показатели могут оцениваться как количественно, так и качественно, в том числе лингвистически (вербально), что характеризует рассматриваемую задачу как неструктурированную или слабоструктурированную. Можно выделить два пути решения таких задач:

1) описание качественных показателей особым образом построенными количественными показателями (балльные оценки, нечеткие числа, лингвистические переменные). При этом считается, что использование ряда математических технологий, таких как теория нечетких множеств, отношений и мер, нечеткого интегрирования, позволяет эффективно формализовать и решать слабоструктурированные задачи;

2) применение методов вербального (порядкового) анализа решений [27], в основе которых лежит построение единой шкалы изменения качества на множестве значений всех показателей и применение так называемых опорных ситуаций (утопического, или идеального, решения, а также противоположного ему решения).

В условиях большого количества частных показателей устойчивости лесных экосистем, их нелинейной взаимосвязи возникает необходимость в разработке нового комбинированного метода многокритериального анализа, суть которого состоит в применении множества опорных ситуаций в виде продукционных моделей предпочтения лица, принимающего решения, обработки данных экспертного опроса методами теории нечетких мер [29—32].

Метод решения. Обозначим через F_1, F_2, \dots, F_m обобщенные показатели устойчивости лесных экосистем. В качестве таких показателей, как уже указывалось, могут рассматриваться: продуктивная способность лесов, санитарное состояние и жизнеспособность лесов; био-

разнообразие и углеродный цикл, защитные, а также социально-экономические функции лесов [17]. В конкретных задачах может использоваться какая-либо выборка из полного перечня показателей. Без потери общности проводимого исследования и во избежание излишней громоздкости записей при описании метода решения будем рассматривать три обобщенных показателя, например, такие, как продуктивная способность (F_1), санитарное состояние (F_2); биоразнообразие (F_3). В конкретных прикладных задачах состав анализируемых показателей может отличаться от этого перечня.

Результирующий (интегральный) показатель устойчивости лесной экосистемы $F_{\text{res}} = f(F_1, F_2, \dots, F_m)$ при отсутствии, в общем случае, аналитического выражения для этой функции можно представить полиномом

$$F_{\text{res}} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^m \lambda_{ij} F_i F_j + \dots + \lambda_{12\dots m} F_1, F_2, \dots, F_m \quad (1)$$

с коэффициентами, отражающими влияние как отдельно взятых показателей F_i (через значения коэффициентов λ_i), так и влияние совокупностей по два (λ_{ij}), три (λ_{ijk}) и т.д. показателей.

Использование обобщенной формулы (1) позволяет описать и учесть отмеченное выше нелинейное влияние совокупности обобщенных показателей на результирующую оценку устойчивости лесной экосистемы.

Для нахождения зависимости $F_{\text{res}} = f(F_1, F_2, \dots, F_m)$ необходимо задать сочетания переменных F_1, F_2, \dots, F_m и определить для каждого из них значения функции F_{res} с тем, чтобы найти значения коэффициентов выражения (1). Данная задача может быть решена следующим образом.

Каждый из обобщенных показателей F_i при оценивании устойчивости представляет собой (в самом общем случае) лингвистическую переменную, принимающую значение из множества простых и составных термов

$$T(F_i) = \{\text{"низкий"}, \text{"ниже среднего"}, \text{"средний"}, \text{"выше среднего"}, \text{"высокий"}\} = \{Н, НС, С, ВС, В\}.$$

Для формального представления термов лингвистических переменных можно использовать нечеткие числа L—R-типа [17, 24]. Тогда значения каждого частного показателя можно представить некоторой 100-балльной шкалой (рис. 1).

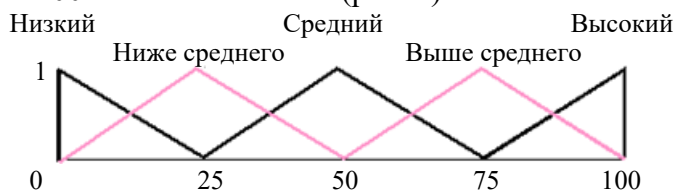


Рис. 1

Необходимо отметить, что условием применения модели (1) является оценивание показателей качества в симметричной относительно среднего значения шкале. Шкала для показателей будет соответствовать этому требованию, если ее значения перевести в биполярную шкалу $[-1, 0, +1]$, в которой среднее значение соответствует нулевому уровню показателя. С этой целью возможные крайние значения лингвистической переменной F_i маркируют как -1 и $+1$, при этом точка „0“ соответствует середине шкалы (в соответствии с физическим смыслом данного показателя). Кодирование текущего значения лингвистической переменной F_i осуществляется по формулам $\hat{F}_i = (F_i - F_{\text{cp}}) / h$, где F_i — значение показателя на шкале лингвистической переменной; $F_{\text{cp}} = (F_{i\text{max}} + F_{i\text{min}}) / 2$ — средняя точка шкалы переменной; $h = (F_{i\text{max}} - F_{i\text{min}}) / 2$ — интервал варьирования; $F_{i\text{max}}, F_{i\text{min}}$ — крайние значения переменной. Результат перевода в новую шкалу представлен на рис. 2.

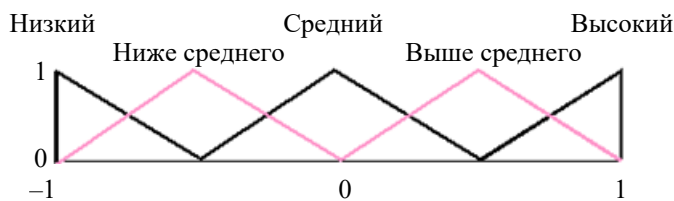


Рис. 2

Обобщенная оценка устойчивости лесной экосистемы формируется на основе анализа одновременно нескольких показателей с соответствующими значениями термов.

В самом общем виде сведения о взаимосвязи частных показателей с результирующим показателем устойчивости F_{res} можно представить продукционными моделями вида: P_j : „IF $F_1 = A_{1j}$ and $F_2 = A_{2j}$ and...and $F_m = A_{mj}$, THEN $F_{res} = A_{jres}$ “, где $A_{ij} \in T(F_i)$, $A_{jres} \in T(F_{res})$ являются термами соответствующих лингвистических переменных.

Принятым качественным оценкам соответствует шкала для результирующего показателя, приведенная на рис. 3, с учетом того, что термы A_{ij}, A_{jres} можно задать с помощью нечетких чисел L—R-типа.

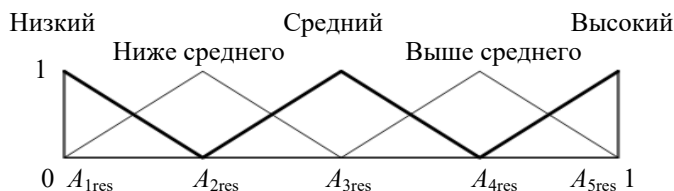


Рис. 3

Расчет значений λ осуществляется по результатам формирования указанных выше продукционных моделей по правилам, принятым в теории планирования эксперимента. Как правило, при сложном взаимодействии частных показателей достоверно сформировать продукционные модели можно только с использованием мнений квалифицированных экспертов в рассматриваемой предметной области.

Для этого вначале строится матрица опроса на профессиональном языке эксперта в крайних значениях показателей $F_i, i = 1(1)m$ (m — число показателей). В случае $m = 3$ матрица опроса имеет вид табл. 1 (П — плохой, НС — ниже среднего, С — средний, ВС — выше среднего, Х — хороший).

Таблица 1

Номер высказывания	F_1	F_2	F_3	F_{res}
1	Низкий	Низкий	Низкий	П
2	Высокий	Низкий	Низкий	НС
3	Низкий	Высокий	Низкий	П
4	Высокий	Высокий	Низкий	С
5	Низкий	Низкий	Высокий	НС
6	Высокий	Низкий	Высокий	ВС
7	Низкий	Высокий	Высокий	С
8	Высокий	Высокий	Высокий	Х

Так, например, во второй строке таблицы представлено следующее суждение эксперта: «Если показатель F_1 имеет значение „высокий“, F_2 — „низкий“, F_3 — „низкий“, то результирующий показатель F_{res} оценивается как „ниже среднего“».

Затем формируется ортогональный план экспертного опроса [33, 34], который для случая $m = 3$ имеет вид табл. 2. Для формирования таблицы использовано кодирование значения „высокий“ в „1“, а значения „низкий“ — в „-1“.

Таблица 2

Номер	F_0	F_1	F_2	F_3	F_1F_2	F_1F_3	F_2F_3	$F_1F_2F_3$	F_{res}
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	П
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	НС
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	П
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	С
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	НС
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	ВС
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	С
8	1	1	1	1	1	1	1	1	Х

Считаем, что каждый показатель может принимать значения из интервала $[0, 1]$, при этом значения термов лингвистической переменной F_{res} могут быть представлены нечеткими треугольными числами, как показано на рис. 4.

Для формирования интегрального показателя с вещественными коэффициентами проведем операцию дефаззификации значений лингвистической переменной F_{res} , для чего каждому терму поставим в соответствие моду его нечеткого числа (П — 0,2; НС — 0,45; С — 0,55; ВС — 0,75; Х — 1).

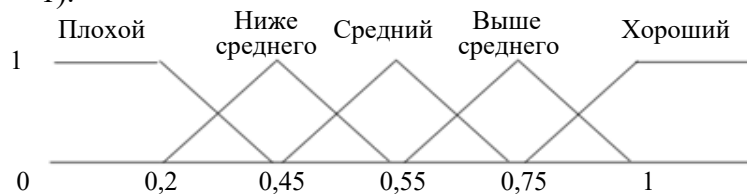


Рис. 4

Расчет коэффициентов полинома (1) производится по правилам, принятым в теории планирования эксперимента [29, 31], для чего вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

F_0F_{res}	F_1F_{res}	F_2F_{res}	F_3F_{res}	$F_1F_2F_{res}$	$F_1F_3F_{res}$	$F_2F_3F_{res}$	$F_1F_2F_3F_{res}$	Значение полинома
0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	0,20
0,45	0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	0,45	0,45	0,45
0,2	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,2	-0,2	0,2	0,20
0,55	0,55	0,55	-0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,55	0,55
0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,40
0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	-0,75	0,75
0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,55
1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
$\lambda_0 = 0,5125$	$\lambda_1 = 0,175$	$\lambda_2 = 0,0625$	$\lambda_3 = 0,1625$	$\lambda_{12} = 0,025$	$\lambda_{13} = 0,025$	$\lambda_{23} = 0,0375$	$\lambda_{123} = 0$	

Таким образом, полином для расчета устойчивости в нашем случае имеет следующий вид:

$$F_{res} = 0,5125 + 0,175F_1 + 0,0625F_2 + 0,1625F_3 + 0,025F_1F_2 + 0,025F_1F_3 + 0,0375F_2F_3. \quad (2)$$

Если не проводить дефаззификацию значений результирующего показателя, приведенная методика позволяет построить функциональную зависимость интегрального показателя устойчивости от F_i с нечеткими коэффициентами $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12\dots m}$.

Таким образом, процедура получения интегральной оценки устойчивости лесных насаждений по совокупности значений обобщенных показателей включает следующие шаги.

Шаг 1. Формирование множества лингвистических шкал для каждого из частных показателей и результирующего показателя устойчивости. Перевод частных показателей в шкалу $[-1, +1]$.

Шаг 2. Проведение экспертного опроса (формирование продукционных правил) и построение ортогонального плана опроса экспертов.

Шаг 3. Определение коэффициентов полинома для определения интегрального (результирующего) показателя устойчивости.

Среди перечисленных шагов наиболее важным и ответственным является шаг 2, связанный с получением ответов экспертов на вопросы, содержащиеся в продукционных правилах. При пяти (и более) частных показателях качества существенно возрастает число задаваемых вопросов и у экспертов возникают объективные трудности в оценивании предлагаемых комбинаций значений показателей. В этом случае выполняются специальные приемы оценивания только простых опорных ситуаций с последующим оцениванием результирующего показателя путем построения конструктивной параметрической λ -нечеткой меры Сугено [23, 32] на конечном множестве простых опорных ситуаций.

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим следующий пример.

Анализируются три участка лесных насаждений, для которых определены значения обобщенных показателей устойчивости (табл. 4), а результаты экспертного опроса по оцениванию совместного влияния обобщенных показателей на устойчивость соответствуют табл. 1; также в табл. 4 приведены результаты перевода указанных в оценок в шкалу $[-1, 1]$.

Таблица 4

Показатель	Участок 1		Участок 2		Участок 3	
	до перевода	после перевода	до перевода	после перевода	до перевода	после перевода
F_1	0,7	0,4	0,5	0	0,8	0,6
F_2	0,3	-0,4	0,9	0,8	0,7	0,4
F_3	0,8	0,6	0,7	0,4	0,4	-0,2

Результирующий показатель устойчивости лесных экосистем, вычисленный по соотношению (2) в соответствии с описанным выше порядком расчета, принимает значения: для первого участка $F_{\text{res}} = 0,69$; для второго — $0,56$; для третьего — $0,61$.

Интересно отметить, что при применении обычной аддитивной свертки обобщенных показателей в случае равных весов показатели устойчивости лесов на 1-м и 2-м участках получались бы одинаковыми. Однако более тонкий учет взаимного влияния показателей при использовании предложенного порядка расчетов позволяет получить и более адекватную результирующую оценку. Тем самым обеспечивается более обоснованный выбор и точный анализ эффективности мер по устойчивому управлению лесными экосистемами.

Заключение. На основе предложенного метода можно оценить значение интегрального показателя устойчивости лесных насаждений, а также провести сравнительный анализ интегральной устойчивости для участков лесной растительности с различными значениями частных показателей, а также для одного и того же участка в разные моменты времени. Реализуется наиболее общий подход к расчетам, учитывающий иерархическую структуру показателей устойчивости: частные показатели—обобщенные показатели—интегральный показатель. При этом обобщенные показатели, на базе которых вычисляется интегральная оценка, представляются в наиболее общем виде: в виде лингвистической шкалы.

Описанный метод формирования интегральной оценки позволяет учесть нелинейные взаимосвязи обобщенных показателей устойчивости лесных насаждений между собой и за счет этого получить наиболее достоверные результаты. Это обеспечивает возможности повышения объективности оценивания мероприятий по управлению лесными экосистемами

и определяет общность предложенного метода и возможность его использования при оценивании качества трудноформализуемых объектов широкого класса. Необходимым условием для такого оценивания является наличие моделей расчета прогнозных значений отдельных показателей при принятии тех или других управленческих решений либо возможность экспертного оценивания данных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазовский Н. Ф., Арманд А. Д. Механизмы устойчивости геосистем. М.: Наука, 1992. 202 с.
2. Куприянова Т. П. Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Институт географии АН СССР, 1989. 333 с.
3. Lara M., Doyen L. Sustainable Management of Natural Resources. Mathematical models and methods. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008. 266 p.
4. Одум Ю. Экология: В 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1986. 328 с.
5. Алексеев А. С. и др. Устойчивое управление лесным хозяйством: научные основы и концепции. СПб: ГЛТА, 1998. 222 с.
6. Керженцев А. С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
7. Коломыц Э. Г., Шарая Л. С. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования // Наземные экосистемы. 2014. С. 93–107.
8. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
9. Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Математическое моделирование экологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 280 с.
10. Хомяков П. М., Иванов В. Д., Искандарян Р. А. и др. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменений природной среды и климата. М.: URSS, 2002. 400 с.
11. Frelich L. E. Forest Dynamics and Disturbance Regimes. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 266 p.
12. Стороженко В. Г. Теория устойчивости в практике лесопатологических обследований рекреационных лесов (на примере древостоев Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН) // Лесохозяйственная информация. 2019. № 4. С. 87–97.
13. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 293 с.
14. Коломыц Э. Г., Керженцев А. С., Шарая Л. С. Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем // Успехи соврем. биологии. 2015. Т. 135, № 1. С. 127–149.
15. Кузнецов В. И., Козлов Н. И., Хомяков П. М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством. М.: URSS, 2005. 232 с.
16. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests. The Montréal Process. Fourth Edition, October 2009 [Электронный ресурс]: <https://montreal-process.org/documents/publications/general/2009/2009p_4.pdf>. (дата обращения: 06.10.2023).
17. Приказ Рослесхоз от 05.02.98 N 21 "Об утверждении критериев и индикаторов устойчивого управления лесами Российской Федерации".
18. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
19. Sokolov B., Zelentsov V. A., Nemykin S. Conceptual and Formal Modelling of Monitoring Systems Structure-Dynamics Control // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems. 2016. Vol. 466. P. 391–401.
20. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
21. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 176 с.

22. Podinovski V. V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rankordered probabilities // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 239, N 2. P. 537—541.
23. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука. 1986. 312 с.
24. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. СПб: ГУАП, 2006. 72 с.
25. Руа Б. Проблемы и методы принятия решений в задачах с многими целевыми функциями // Вопросы анализа и процедуры принятия решения. М.: Мир, 1976. С. 21—58.
26. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
27. Ларичев О. И. Вербальный анализ решений. М.: Наука, 2006. 181 с.
28. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
29. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. Models and methods for multicriteria situational flexible reassignment of control functions in man-machine systems // Proc. of the 2016 IEEE 8th Intern. Conf. on Intelligent Systems. 2016. P. 402—408.
30. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Pavlov A. A., Slin'ko A. A. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems // Proc. of the 6th Computer Science On-line Conf. 2017 (CSOC2017). 2017. Vol. 2: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. P. 131—140.
31. Зеленцов В. А., Павлов А. Н. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 7—12.
32. Пытьев Ю. П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 464 с.
33. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 131 с.
34. Спасивцев А. В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 238 с.

Сведения об авторе

Вячеслав Алексеевич Зеленцов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

Поступила в редакцию 26.10.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023; принята к публикации 17.12.23.

REFERENCES

1. Glazovsky N.F., Armand A.D. *Mekhanizmy ustoychivosti geosistem* (Mechanisms of Stability of Geosystems), Moscow, 1992, 202 p. (in Russ.)
2. Kupriyanova T.P. *Faktory i mekhanizmy ustoychivosti geosistem* (Factors and Mechanisms of Stability of Geosystems), Moscow, 1989, 333 p. (in Russ.)
3. Lara M., Doyen L. *Sustainable Management of Natural Resources. Mathematical models and methods*, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2008, 266 p.
4. Odum E.P. *Basic Ecology*, CBS College Publishing, 1983.
5. Alekseev A.S. et al. *Ustoychivoye upravleniye lesnym khozyaystvom: nauchnyye osnovy i kontseptsii* (Sustainable Forest Management: Scientific Foundations and Concepts), St. Petersburg, 1998, 222 p. (in Russ.)
6. Kerzhentsev A.S. *Funktsional'naya ekologiya* (Functional Ecology), Moscow, 2006, 259 p. (in Russ.)
7. Kolomyts E.G., Sharaya L.S. *Nazemnyye ekosistemy* (Terrestrial Ecosystems), 2014, pp. 93—107. (in Russ.)
8. Poluektov R.A., Pykh Yu.A., Shvytov I.A. *Dinamicheskiye modeli ekologicheskikh sistem* (Dynamic Models of Ecological Systems), Leningrad, 1980, 288 p. (in Russ.)
9. Semevsky F.N., Semenov S.M. *Matematicheskoye modelirovaniye ekologicheskikh protsessov* (Mathematical Modeling of Environmental Processes), Leningrad, 1982, 280 p. (in Russ.)
10. Khomyakov P.M., Ivanov V.D., Iskandaryan R.A. et al. *Geoekologicheskoye modelirovaniye dlya tseley upravleniya prirodopol'zovaniyem v usloviyakh izmeneniy prirodnoy sredy i klimata* (Geoecological Modeling for Environmental Management Purposes under Conditions of Environmental and Climate Change), Moscow, 2002, 400 p. (in Russ.)

11. Frelich L.E. *Forest Dynamics and Disturbance Regimes*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 266 p.
12. Storozhenko V.G. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2019, no. 4, pp. 87–97. (in Russ.)
13. Svirezhev Yu.M., Logofet D.O. *Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv* (Stability of Biological Communities), Moscow, 1978, 293 p. (in Russ.)
14. Kolomyts E.G., Kerzhentsev A.S., Sharaya L.S. *Uspekhi Sovremennoi Biologii*, 2015, no. 1(135), pp. 127–149. (in Russ.)
15. Kuznetsov V.I., Kozlov N.I., Khomyakov P.M. *Matematicheskoye modelirovaniye evolyutsii lesa dlya tseley upravleniya lesnym khozyaystvom* (Mathematical Modeling of Forest Evolution for Forest Management Purposes), Moscow, 2005, 232 p. (in Russ.)
16. *Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests*, The Montréal Process, October 2009, https://montreal-process.org/documents/publications/general/2009/2009p_4.pdf.
17. *Prikaz Rosleskhoz ot 05.02.98 N 21 "Ob utverzhdenii kriteriyev i indikatorov ustoychivogo upravleniya lesami Rossiyskoy Federatsii"* (Order of Rosleskhoz dated 02/05/98 N 21 "On approval of criteria and indicators for sustainable forest management of the Russian Federation"). (in Russ.)
18. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
19. Sokolov B., Zelentsov V.A., Nemykin S. *Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems*, 2016, vol. 466, pp. 391–401.
20. Keeney R.L., Raiffa H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, NY, Wiley, 1976.
21. Nogin V.D. *Prinyatiye resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod* (Decision Making in a Multicriteria Environment: a Quantitative Approach), Moscow, 2005, 176 p. (in Russ.)
22. Podinovski V.V. *European Journal of Operational Research*, 2014, no. 2(239), pp. 537–541.
23. Pospelov D.A., ed., *Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* (Fuzzy Sets in Models of Control and Artificial Intelligence), Moscow, 1986, 312 p. (in Russ.)
24. Pavlov A.N., Sokolov B.V. *Prinyatiye resheniy v usloviyakh nechetkoy informatsii* (Decision Making under Conditions of Unclear Information), St. Petersburg, 2006, 72 p. (in Russ.)
25. Roy B. *Problems and methods with multiple objective functions* in *Mathematical Programming*, 1971, no. 1(2), pp. 239–266.
26. Steuer R.E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*, 1986, 546 p.
27. Larichev O.I. *Verbal'nyy analiz resheniy* (Verbal Analysis of Decisions), Moscow, 2006, 181 p. (in Russ.)
28. Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. *Vychislitel'nyye metody issledovaniya i proyektirovaniya slozhnykh system* (Computational Methods for Studying and Designing Complex Systems), Moscow, 1982, 286 p. (in Russ.)
29. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. *Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems*, 2016, pp. 402–408.
30. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Pavlov A.A., Slin'ko A.A. *Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Vol. 2: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems*, 2017, pp. 131–140.
31. Zelentsov V.A., Pavlov A.N. *Information and Control Systems*, 2010, no. 6, pp. 7–12. (in Russ.)
32. Pytyev Yu.P. *Vozmozhnost' kak al'ternativa veroyatnosti. Matematicheskiye i empiricheskiye osnovy, primeneniye* (Possibility as an Alternative to Probability. Mathematical and Empirical Foundations, Application), Moscow, 2007, 464 p. (in Russ.)
33. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh* (Methods of Experiment Planning and Data Processing), Samara, 2016. 131 p. (in Russ.)
34. Spesivtsev A.V. *Upravleniye riskami chrezvychaynykh situatsiy na osnove formalizatsii ekspertnoy informatsii* (Emergency Risk Management Based on Formalization of Expert Information), St. Petersburg, 2004, 238 p. (in Russ.)

Data on author

Vyacheslav A. Zelentsov — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

Received 26.10.2023; approved after reviewing 03.11.2023; accepted for publication 17.12.23.