

**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ»  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

**Всероссийская научная конференция**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭВОЛЮЦИИ ПРИРОДЫ  
И ОБЩЕСТВА: ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ.  
К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ  
АКАДЕМИКА Н.Н. МОИСЕЕВА  
(МОИСЕЕВ – 100)**

**г. Москва, 7-10 ноября 2017**

**ТРУДЫ**

**Москва – 2017**

УДК 519.8; 504.03; 330.4  
ББК 22.18

**Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт.  
К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева (МОИСЕЕВ-100).  
Москва, 7-10 ноября 2017. Труды Всероссийской научной конференции /  
Отв. редактор И.Г. Поспелов. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. 448 с.**

Настоящий сборник включает доклады, представленные на Всероссийской научной конференции с международным участием «Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева» и отобранные Программным комитетом конференции. Доклады отражают последние достижения в области моделирования эколого-экономических систем, управления и оптимизации, механики, теории принятия решений, автоматизации проектирования. Конференция проводится Вычислительным центром им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН при участии МГУ им. М.В. Ломоносова и МФТИ (ГУ). К работе конференции привлечены ведущие ученые в соответствующих областях.

Издание осуществлено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 17-07-20553 и Федерального агентства научных организаций.

Ответственный редактор: член-корр. РАН И.Г. Поспелов.

Научные редакторы и составители: А.В. Шатров, Н.Н. Оленёв.

Редактор Н.П. Петрова.

Технические редакторы Ф.В. Костюк, Т.В. Сидорова.

**Co-Evolution of Nature and Society Modelling, Problems & Experience. Devoted to Academician Nikita Moiseev centenary (Moiseev-100). Moscow, 7-10 November 2017. Proceedings of All-Russia scientific conference / Ed. Igor Pospelov. Moscow, FRC CSC RAS, 2017. 448 p.**

Conference is organized by Dorodnicyn Computing Centre of Federal Research Centre “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS), Lomonosov Moscow State University (MSU) and Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) and devoted to memory of academician Nikita Moiseev. The conference brings together leading scientists to discuss modeling of ecology-economics systems, control, optimization, mechanics, decision making and machine-aided design. Reports selected by Conference Program Committee are included into this volume.

Supported by Russian Foundation for Basic Research (project №17-07-20553) and by Federal Agency of Scientific Organizations.

Editor-in-Chief Corresponding member of RAS Igor Pospelov.

Originator and Scientific Editors: Anatoly Shatrov, Nikolay Olenev.

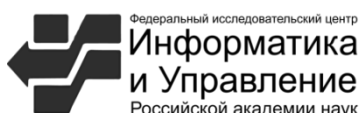
Editor: Natalya Petrova.

Technical Editors: Felix Kostyuk, Tatiana Sidorova.

**ISBN 978-5-91993-073-0**

Научное издание

© Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук, 2017



## ДВУХУРОВНЕВАЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ В ПОРТУГАЛИИ

\* В.А.Бушенков<sup>1</sup>, С. Маркеш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Университет Эворы, Департамент математики,  
Португалия, 7000-671, г. Эвора, ул. Ромао Рамалью 59.  
Тел.: (351)266-745-370, факс: (351)266-745-393,  
e-mail: bushen@uevora.pt

<sup>2</sup> Лиссабонский Технический университет,  
Высший институт агрономии, Исследовательский центр леса,  
Португалия, 1349-017, г. Лиссабон, Тапада да Ажуда,  
Тел.: (351) 213-653-100, факс: (351) 213-653-195,  
e-mail: smarques@isa.ulisboa.pt

**Аннотация.** Метод Интерактивных карт решений (IDM) успешно используется в течение нескольких десятилетий для анализа многокритериальных экономических и экологических задач с большим количеством переменных. Ключевым элементом для построения карт решений является Эджворт-Парето оболочка (ЭПО) допустимого множества в пространстве критериев, построение (или аппроксимация) которой является трудной вычислительной задачей. Для решения этой задачи были предложены декомпозиционные методы, основанные на аппроксимации ЭПО для подсистем (блоков) с их последующим объединением. Мы описываем применение метода IDM к региону Vale de Sousa в Португалии, фрагментированному из-за большого количества частных владений. Частные владения объединены в три округа (три блока). Представлены результаты применения декомпозиционного метода для аппроксимации ЭПО. Проиллюстрирован процесс принятия решений в двухуровневой системе.

**Ключевые слова:** управление лесным хозяйством, многокритериальная оптимизация, двухуровневая задача, декомпозиционный метод.

Метод Интерактивных карт решений (Interactive decision maps – IDM), предложенный в работах А.В. Лотова и его учеников [1] успешно используется в течение нескольких десятилетий для анализа многокритериальных экономических и экологических задач с большим количеством переменных, например [2-4]. В методе IDM используется интерактивная визуализация и анимация границы Парето. Изучая карты решений, лица, принимающие решения, находят эффективные возможные комбинации критериев. Ключевым элементом для построения карт решений является Эджворт-Парето оболочка (ЭПО) допустимого множества критериев, то есть самого большого множества с той же границей Парето, что и рассматриваемая проблема. В случае большого числа переменных построение (или аппроксимация) ЭПО является трудной вычислительной задачей, для решения которой были предложены декомпозиционные методы. Общая схема методов декомпозиции основана на аппроксимации ЭПО для подсистем с блочной сепарабельной структурой с

последующим их объединением для построения ЭПО всей системы. Мы описываем применение метода IDM к региону Vale de Sousa в Португалии, фрагментированному из-за большого количество частных владений. Частные владения объединены в три округа (три блока). Декомпозиционный метод построения ЭПО позволяет эффективно реализовать двухуровневую систему поддержки принятия решений, в которой взаимодействуют ЛПР верхнего уровня, представляющие интересы всего региона, с ЛПР нижнего уровня, представляющим интересы владельцев лесных участков. В статье кратко описана модель лесного хозяйства региона, представлены результаты применения декомпозиционного метода для аппроксимации ЭПО и проиллюстрирован процесс принятия решений в двухуровневой системе.

### **Модель изучаемого региона**

Эвкалипт и морская сосна являются наиболее распространенными видами в экосистемах, характерных для средиземноморского лесного хозяйства в Португалии. Для целей методологического тестирования рассматривался один регион, расположенный на северо-западе Португалии (регион Vale de Sousa). Этот регион находится в сельской местности со средиземноморским климатом с атлантическим влиянием. Регион простирается на 14 832 га и разделяется на 2182 лесных участков. В нем доминируют чистые насаждения эвкалиптов и смешанные насаждения эвкалиптов и морской сосны – около 66% и 33% площади региона соответственно. Оставшаяся площадь (1%) занята лиственными породами. В муниципальном управлении находятся 35% площади, средняя и крупная частная собственность (площадь более 5 га) занимает более чем 60%, остальные 5% принадлежат мелким владельцам леса. Всего в регионе насчитывается 378 частных владельцев. В регионе можно выделить три субрегиона в соответствии с границами округов Paiva, Paredes и Penafiel, образующих блочную структуру.

Ассоциация владельцев лесов (AFVS) является ключевой заинтересованной стороной в управлении, она имеет прямой доступ ко всем региональным и национальным органам. Целью AFVS является региональное планирование, направленное на содействие устойчивому лесному хозяйству в соответствии с национальными руководящими принципами лесной политики. Задачами AFVS являются также предотвращение лесных пожаров, опустынивания и депопуляции.

Эвкалиптовая древесина, сосновая древесина и пиломатериалы имеют очень высокий рейтинг в списке экосистемных услуг. Кроме того, этот регион предоставляет услуги по отдыху и туризму, важно также поддержание уровня накопления углерода в экосистемах лесов.

Математические модели экосистемы региона, использованные в исследовании, включают как информацию на макроуровне, так и данные на уровне дерева, а также топографическую информацию о расположении лесных участков, дорожной сети, водных потоков, типов почв и классов склонов. Принятие решений в модели основывается на сценариях, предписывающих способы управления для каждого типа лесного участка в течение временного горизонта в 90 лет. Для автоматизации процесса построения сценариев использовался инструментарий поддержки решений SADfLOR [2,4]. Этот инструментарий имеет информационный модуль, хранящий цифровые и топологические данные для каждого из участков, кроме того имеется генератор сценариев и имитационные модули для моделирования роста и урожайности леса и оценивания вклада в предоставление экосистемных услуг. В рассматриваемом

примере для региона Vale de Sousa было сформировано в общей сложности 83000 сценариев.

Матричный генератор SADfLOR автоматически создает модель линейного программирования, пригодную для назначения наилучшего из сформулированных сценариев для каждого из лесных участков в соответствии с заданными критериями оптимальности. Переменные решения  $x_{ij}$  определяют долю площади участка  $i$ , управляемую по сценарию  $j$ . Критериями верхнего уровня являются: WOOD - суммарное производство древесины (по всем блокам), CARB - среднее значение накопленного углерода в экосистеме (по всем блокам), e VolEI - оценка стоимости экосистемы в конце планируемого периода (по всем блокам). На нижнем уровне, кроме критериев верхнего уровня, берутся во внимание также аспекты, связанные туристическим и рекреативным бизнесом, противоэрозионные меры, а также снижение рисков лесных пожаров.

### Построение ЭПО верхнего и нижнего уровней

Для применения метода Интерактивных карт решений фундаментальным является построение (аппроксимация) Эджворт-Парето оболочки множества допустимых значений критериев. Модель рассматриваемой системы является блочно сепарабельной и размеры моделей для округов Paiva, Paredes и Penafiel и полной модели характеризуются данными, представленными в табл.1.

Таблица 1. Размеры задач линейного программирования

	<i>Paiva</i>	<i>Paredes</i>	<i>Penafiel</i>	<i>Полная модель</i>
<i>Число строк</i>	3515	2392	2790	8700
<i>Число столбцов</i>	46355	8884	20844	76086
<i>Число ненулей</i>	15394015	2307164	6504067	24250258

С методологической целью было решено аппроксимировать ЭПО верхнего уровня двумя способами: 1) используя полную модель всего региона; 2) применяя декомпозиционный метод предложенный в [5,6]. Вычисления выполнялись на персональном компьютере с процессором Intel Core i7 частотой 1.60 гц и оперативной памятью 8Gb. Для решения вспомогательных задач использовались системы линейного программирования *srlex* и *glpk*. Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Как видно из представленных результатов, декомпозиционный метод имеет явное преимущество по времени по сравнению с прямым построением ЭПО по полной модели. Заметим, что построить это множество с погрешностью в 1% системой ЛП с открытым кодом *glpk* не удалось за разумное время. Представляется, что преимущество декомпозиционного метода будет только увеличиваться при увеличении числа блоков в модели.

Таблица 2. Время аппроксимации ЭПО в секундах

	сplex точность 10%	сplex точность 1%	glpk точность 10%
ЭПО Paiva	119	737	3274
ЭПО Paredes	16	106	21
ЭПО Penafiel	72	417	361
Построение ЭПО верхнего уровня на основе блочных ЭПО	1	1	1
<b>Время построения ЭПО верхнего уровня декомпозиционным методом</b>	<b>208</b>	<b>1261</b>	<b>3657</b>
<b>Время построения ЭПО верхнего уровня по полной модели</b>	<b>556</b>	<b>3728</b>	<b>11812</b>

### Принятие решений в двухуровневой системе

На первом этапе ЛПР верхнего уровня анализируют возможные эффективные решения в пространстве критериев для всего региона, используя Интерактивные карты решений (IDM), выбирают наилучшую критериальную точку ( $WOOD^*$ ,  $CARB^*$ ,  $VolEI^*$ ), причем система автоматически вычисляет соответствующие ей критериальные компоненты для блоков. В нашем примере это ( $WOOD^*_{Paiva}$ ,  $CARB^*_{Paiva}$ ,  $VolEI^*_{Paiva}$ ), ( $WOOD^*_{Paredes}$ ,  $CARB^*_{Paredes}$ ,  $VolEI^*_{Paredes}$ ) и ( $WOOD^*_{Penafiel}$ ,  $CARB^*_{Penafiel}$ ,  $VolEI^*_{Penafiel}$ ), причем выполняются соотношения

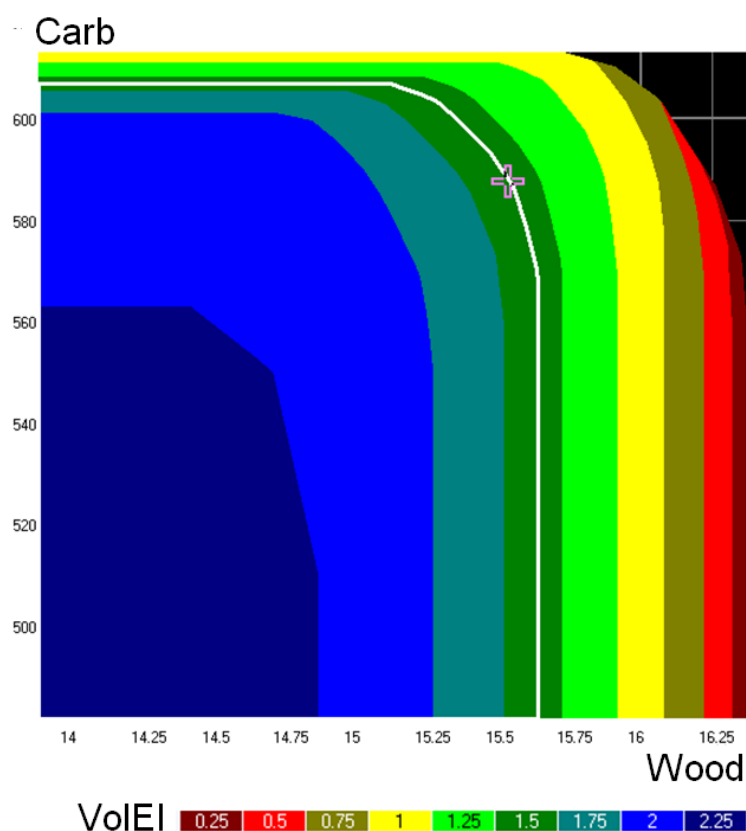
$$WOOD^* = WOOD^*_{Paiva} + WOOD^*_{Paredes} + WOOD^*_{Penafiel},$$

$$CARB^* = CARB^*_{Paiva} + CARB^*_{Paredes} + CARB^*_{Penafiel},$$

$$VolEI^* = VolEI^*_{Paiva} + VolEI^*_{Paredes} + VolEI^*_{Penafiel}.$$

Получив сформулированные на верхнем уровне предложения для трех критериев своего блока, ЛПР нижнего уровня визуализирует их на Интерактивной карте решений своего блока, которая может включать дополнительные критерии, отражающие локальные интересы – интересы частных владельцев лесных участков, относящихся к округу, рекреативный и туристический бизнес, оценку решений с точки зрения противоэрозионной и противопожарной защиты. Полученное с верхнего уровня предложение может быть скорректировано и отправлено на верхний уровень. Получив все скорректированные предложения нижних уровней, ЛПР верхнего уровня может визуализировать на карте решений итоговую точку, приемлемую для всех округов, оценить разницу между начальным и итоговым предложением и при необходимости сформулировать новое эффективное решение для всего региона.

В качестве иллюстрации, на рисунке представлен пример Интерактивной карты решений верхнего уровня с выбранной эффективной точкой.



### Литература.

1. Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K. Interactive Decision Maps. Approximation and Visualization of Pareto Frontier. Boston: Kluwer, 2004.
2. Garcia-Gonzalo J., Palma J., Freire J., Tomé M., Mateus R., Rodriguez L.C.E., Bushenkov V. and Borges J.G. A decision support system for a multi stakeholder's decision process in a Portuguese National Forest // *Forest Systems*, 2013. V. 22/ Pp.359-373.
3. Lotov A.V., Ryabikov A.I., Buber A.L. Pareto Frontier Visualization in the Development of Release Rules for Hydro-Electrical Power Stations // *Scientific and Technical Information Processing*, 2014. V. 41. Pp. 314-324.
4. Garcia-Gonzalo J., Bushenkov V., McDill M., Borges, J. A Decision Support System for Assessing Trade-Offs between Ecosystem Management Goals: An Application in Portugal // *Forests*, 2015. V. 6. Pp. 65-87.
5. Lotov A.V. Decomposition methods for the Edgeworth-Pareto hull approximation // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2015 V. 55 (10). Pp 1653-1664.
6. Lotov A.V. Decomposition methods for polyhedral approximation of the Edgeworth-Pareto hull // *Doklady Mathematics*, 2015. V. 92 (3). Pp. 784-787.