

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРАВИЛА УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ДИАЛОГОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГРАНИЦЫ ПАРЕТО

**А.В. Лотов**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*  
Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 44, кор. 2  
E-mail: avlotov@yandex.ru

**А.И. Рябиков**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*  
Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 44, кор. 2  
E-mail: ariabikov@gmail.com

**Ключевые слова:** эколого-экономическая система, случайный фактор, правило управления, многокритериальная оптимизация, граница Парето, аппроксимация, визуализация.

**Аннотация:** Описывается методика многокритериальной оптимизации правила управления динамической системой, подверженной воздействию случайных факторов, и ее применение для анализа эколого-экономической проблемы. Система задана модулем, позволяющим по правилу управления и сценарию случайных факторов рассчитать траекторию системы, что позволяет оценить значения критериев выбора решения. Структура правила управления задана, требуется оптимизировать его параметры. Поддержка выбора правила управления осуществляется на основе аппроксимации и диалоговой визуализации границы Парето, что помогает пользователям выработать представление о достижимых величинах и объективных замещениях критериев и способствует поиску эффективного компромисса между ними.

## 1. Введение

В докладе описывается методика оптимизации правила управления эколого-экономической системой, подверженной воздействию случайного фактора, который моделируется случайным процессом. Особенностью является учет многих критериев выбора правила управления, а также то, что в принятии решения участвует большое число лиц, заинтересованных в величинах критериев. Считается, что структура правила управления задана, а принимаемое решение состоит в выборе его параметров. К описанию динамической системы предъявляются минимальные требования: считается, что она задана вычислительным модулем, позволяющим по заданному правилу управления и реализации случайного процесса рассчитать траекторию системы, на основе которой можно оценить значения показателей, представляющих интерес для пользователей и служащих основой для расчета значений критериев.

## 2. Методика

Предлагаемая методика была разработана для поддержки принятия решения в эколого-экономических проблемах, которые обычно характеризуются наличием нескольких критериев и участием многих лиц в выборе решения [1]. Существует несколько различных подходов к задачам оптимизации при нескольких критериях [2]. В последние 20-30 лет широкое распространение получили методы, основанные на аппроксимации границы Парето, т.е. недоминируемой (неулучшаемой) границы множества достижимых значений критериев. Поскольку граница Парето содержит все неулучшаемые сочетания критериев, разумные компромиссы следует искать среди ее точек. Именно такой подход был предложен в [3] для поиска компромисса в эколого-экономических проблемах, в которых предполагаются переговоры между различными лицами, участвующими в поиске согласованного решения. Отметим, что в нелинейном случае граница Парето обычно представляется пользователям в виде набора критериальных точек этой границы [4], которые даются переговорщикам в виде списка точек. Именно таким образом граница Парето была, например, представлена в процессе поиска компромиссного правила управления попуском плотины озера Маджоре, расположенного на границе Италии и Швейцарии, закончившегося выбором неулучшаемого правила управления, одобренного всеми организациями, участвовавшими в переговорах [5].

В нашем подходе также используется аппроксимация границы Парето, но, в отличие от обычного подхода, мы аппроксимируем не саму границу Парето, а неулучшаемую границу несколько более широкого множества -- оболочки Эджворта-Парето (ОЭП) множества достижимых значений критериев, т.е. максимального по включению множества, имеющего ту же самую границу Парето. Применение аппроксимации ОЭП (вместо границы Парето непосредственно) связано как с неустойчивостью границы Парето по отношению к возмущениям параметров задачи [6], так и с удобством диалоговой визуализации ОЭП, в том числе его неулучшаемой границы. К настоящему времени нами разработаны методы аппроксимации ОЭП для многих типов задач и решены как учебные, так и прикладные задачи [7-9].

Для визуализации границы Парето с использованием построенной аппроксимации ОЭП применяется диалоговая (интерактивная) визуализация так называемых карт решений, каждая из которых представляет собой несколько двумерных (двухкритериальных) сечений ОЭП, наложенных одно на другое. Граница сечения ОЭП дает представление о сечении границы Парето. При выборе карты решений прежде всего выбираются два критерия, в координатах которых будет построено изображение. Далее, среди остальных критериев выбирается еще один («цветовой») критерий, диапазон значений которого разбивается на несколько отрезков. При этом каждому отрезку значений третьего критерия соответствует одно сечение, которое изображается своим цветом. Сечения накладываются одно на другое. Как известно [2], границы Парето двухкритериальных сечений ОЭП при монотонном изменении третьего критерия не пересекаются, что делает удобным использование карты решений для изучения влияния третьего критерия на двухкритериальное сечение. Карты изображаются интерактивно, по требованию пользователя, который может таким образом легко получить и проанализировать десятки карт решений. В связи с этим такой подход получил название метода Диалоговых карт решений (ДКР).

Представление границы Парето в наглядном графическом виде позволяет легко анализировать ее форму, т.е. достижимые значения критериев и их связь между собой на границе Парето. Это помогает найти в результате неформализованного обсуждения предпочтительный компромисс. Выбор компромисса дополняется нахождением

правила управления, обеспечивающих этот компромисс. Вопрос о том, каким путем среди совокупности неулучшаемых сочетаний критериев будет найден компромисс (а по нему – соответствующий неулучшаемый вариант решения) решается в каждом конкретном случае в соответствии с традициями проведения переговоров. Скажем, в задаче [5] требовался консенсус в совместном заседании переговорщиков, в других случаях могут использоваться другие формы. Для решения этой проблемы могут использоваться как различные официальные совещания и обсуждения, так и неформальные переговоры между заинтересованными лицами, а также обращения в вышестоящие организации и СМИ. В любом случае анализ совокупности неулучшаемых сочетаний критериев не противоречит существующей культуре проведения переговоров, что обеспечивает его практичность. По существу, предлагаемый подход состоит в дополнительном информировании участников переговоров о том, какие из возможных компромиссов разумны.

### 3. Применение метода ДКР

В данной работе описывается применение метода ДКР в рамках такой важной проблемы как формирование правил управления каскадом водохранилищ бассейна реки Ангара, включающем озеро Байкал. Особенностью бассейна Ангары является наличие большого числа противоречивых требований к правилам управления каскадом. Действительно, водохранилища являются важнейшими возобновляемыми источниками энергии, а также играют большую роль в удовлетворении потребности в воде многих отраслей народного хозяйства, таких как водный транспорт, коммунальное хозяйство, рыбное хозяйство и так далее. В то же время, водохранилища могут оказывать существенное негативное воздействие на состояние природных систем. В рамках правил управления каскадом должен быть реализован компромисс между экономическими, коммунальными и экологическими требованиями к водопользованию.

Для избежания отрицательных экологических последствий больших колебаний уровня озера Байкал в 2001 году были установлены минимальное и максимальное значения уровня воды в озере Байкал на отметках соответственно 456 и 457 метров над уровнем океана. Такое решение было обосновано требованиями некоторых экологов, считавших что такое уменьшение колебаний Байкала создаст благоприятные условия для экологии Байкала, в особенности для воспроизводства омуля. Специалисты по водному хозяйству с самого начала предупреждали, что это решение неправильно, поскольку противоречит естественным процессам колебания уровня Байкала и мешает запасти воду в многоводные годы для ее использования в маловодные. Это утверждение основывалось на том, что в естественном состоянии (до строительства системы водохранилищ) колебания уровня Байкала составляли более двух метров. Предсказания водохозяйственников сбылись в годы низкой приточности (2014-2018 гг.), когда уровень Байкала упал ниже 456 м. В связи с этим было принято постановление, в котором в маловодный период устанавливалось минимальное значения уровня в 455,54 метра, а в многоводный период устанавливалось максимальное значения уровня в 457,85 метра. Вопрос о том, в какой мере это временное постановление должно стать основой постоянного постановления и являются ли его ограничения обоснованными с точки зрения противоречивых требований к ангарскому каскаду водохранилищ, остался открытым и потребовал дополнительных исследований. Одно из таких исследований описывается в данном докладе.

Рассмотрим вопрос об управлении каскадом. Оно должно решать стоящие задачи, стоящие перед каскадом, при наличии неточной информации о будущей приточности к водохранилищам. Как обычно, используется обратная связь, т.е. правила пуска отдельных водохранилищ базируются на информации об их текущем состоянии, а именно на уровнях воды [10]. Что же касается приточности, то в правилах может использоваться знание о только ближайшем будущем.

Правило управления одним водохранилищем представляет собой так называемый диспетчерский график. При его построении год разбивается на конечное число неравных интервалов времени (20-25 интервалов), для каждого из которых задается разбиение всех возможных уровней воды в водохранилище на небольшое число зон (3-7 зон, в зависимости от номера интервала). Обычно в качестве длины интервала в половодье берется одна декада, а в межень - один месяц. Каждой зоне соответствует определенный пуск через плотину. Величина этого пуска определяется заранее, при проектировании плотины. Вариант пуска выбирается на основе попадания текущего значения уровня воды в определенную зону. Правило пуска для одного водохранилища задано полностью тогда, когда построены разбиения уровня воды для всех интервалов времени. Таким образом, диспетчерский график одного водохранилища задается вектором, содержащим от 60 до 200 элементов. Правило управления для каскада в целом задается совокупностью векторов, каждый из которых соответствует диспетчерскому графику одного из водохранилищ.

Важной особенностью рассматриваемой проблемы является наличие большого числа организаций и физических лиц, заинтересованных в выполнении тех или иных требований к правилам управления. К таким лицам и организациям относятся и администрации регионов, расположенных в бассейне реки, и собственники и сотрудники предприятий, использующих водные ресурсы, и организации экологического контроля, и политические партии, и рядовые жители региона. Противоречивые требования этих групп должны быть в той или иной мере учтены при разработке правил управления каскадом водохранилищ.

Был использован вычислительный модуль расчета динамики состояния бассейна Ангары, предназначенный для оценки эффективности того или иного правила управления каскадом. Для расчетов по модулю требуется задать некоторый сценарий приточности к бассейну. Для построения таких сценариев приточности используется информация, собранная организациями гидрометеослужбы в форме многолетних гидрологических рядов наблюдений. В частности, для Байкала и бассейна Ангары собраны ряды большой продолжительности (более сотни лет). На основе рядов наблюдений можно построить случайный процесс, описывающий закономерности случайной приточности [11]. В свою очередь, на основе реализации случайного процесса можно сгенерировать искусственный гидрологический ряд любой продолжительности и использовать в расчетах. В сгенерированном ряду можно учесть гипотезы об изменении приточности как следствия изменения климата.

Используемые в данной работе критерии выбора правил управления строятся в соответствии с методикой, принятой в водохозяйственной деятельности. Экономические, коммунальные и экологические требования порождают систему ограничений на характеристики рассматриваемой эколого-экономической системы. В связи с наличием случайных факторов эти ограничения могут выполняться с некоторой частотой, которую принято называть обеспеченностью выполнения требования. Значения обеспеченности противоречивых требований, отражающих интересы различных организаций, используются в качестве критериев выбора правил управления. Нами было рассмотрено 24 критерия такого типа. Описанное выше задание правила

управления каскадом превращает рассматриваемую проблему в задачу многокритериальной оптимизации.

Сложность задачи аппроксимации ОЭП в данном случае состояла в том, можно было использовать исключительно вариантный расчет значений критериев при заданных параметрах правил управления. К тому же критерии были разрывными и, как оказалось, многоэкстремальными. Ранее разработанные методы аппроксимации ОЭП для такой задачи оказались непригодны, поэтому были разработаны новые методы, основанные на интеграции градиентных методов аппроксимации ОЭП [12, 13] и генетических методов аппроксимации границы Парето [14]. Новые методы позволили построить аппроксимацию ОЭП, представлявшую собой объединение 10 тысяч конусов с вершинами в недоминируемых критериальных точках [15]. Анализ десятков карт решений, получаемых в интерактивном режиме на дисплее компьютера с использованием построенной аппроксимации ОЭП, позволил эксперту найти правило управления каскадом, которое может служить основой для компромисса между противоречивыми требованиями к бассейну. Методика и результаты данного исследования подробно описаны в [16].

## Список литературы

1. Lotov A.V. Computer-Based Support for Planning and Negotiation on Environmental Rehabilitation of Water Resource Systems // *Rehabilitation of Degraded Rivers: Challenges, Issues and Experiences* (ed. by D.P. Loucks). Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 417-446.
2. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: МАКС Пресс, 2008.
3. Loucks D.P., van Beek E. *Water Resources Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Paris and Delft: UNESCO, 2005.
4. Miettinen K. *Nonlinear multiobjective optimization*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
5. Soncini-Sessa R., Cellina F., Pianosi F., a.o. *Integrated and Participatory Water Resources Management: Practice*. Amsterdam: Elsevier, 2007.
6. Sawaragi Y., Nakayama H., Tanino T. *Theory of multiobjective optimization*. Orlando: Academic Press, 1985.
7. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К. и др. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997.
8. Лотов А.В. Компьютерная визуализация оболочки Эджворта-Парето и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2002. № 1. С. 83-100.
9. Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K. *Interactive Decision Maps. Approximation and Visualization of Pareto Frontier*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 310 p.
10. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
11. Болгов М.В., Сарманов И.О., Сарманов О.В. Марковские процессы в гидрологии. М. 2009. 211 с.
12. Березкин В.Е., Каменев Г.К., Лотов А.В. Гибридные адаптивные методы аппроксимации невыпуклой многомерной границы Парето // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2006. Т. 46. № 11. С. 2009-2023.
13. Березкин В.Е., Лотов А.В., Лотова Е.А. Изучение гибридных методов аппроксимации оболочки Эджворта-Парето в нелинейных задачах многокритериальной оптимизации // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2014. Т. 54. № 6. С. 905-918.
14. Deb K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester: Wiley, 2001.
15. Лотов А.В., Рябиков А.И. Дополненный метод стартовой площадки аппроксимации границы Парето в задачах с многоэкстремальными критериями // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2021. Т. 61, № 10. С. 1734-1744.
16. Лотов А.В., Рябиков А.И., Болгов М.В. и др. Использование границы Парето при поиске компромиссных правил регулирования уровня озера Байкал // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2022. № 3. С. 72-87.