

Поддержка принятия стратегических решений по обеспечению водой Нижней Волги на основе визуализации границы Парето¹

Аннотация. Описывается опыт применения визуализации неуправляемой границы Парето при поддержке принятия решений в рамках многостороннего (целостного) рассмотрения экологических проблем в задаче выбора стратегических решений об использовании водных ресурсов Волги. Основное внимание уделяется задачам сохранения природной среды и экономического развития Волго-Ахтубинской поймы. Дается описание методики, формулируется проблема исследования и приводится интегрированная математическая модель, которая позволяет оценить обеспеченность выполнения противоречивых требований к управлению водными ресурсами реки. Показывается, что визуализация границы Парето является эффективным средством поддержки принятия решения при выборе достижимой долгосрочной стратегической цели управления Волго-Камским каскадом водохранилищ.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, многокритериальная оптимизация, визуализация границы Парето, многостороннее рассмотрение экологических проблем, Волго-Ахтубинская пойма.

Введение

Визуализация границы Парето используется в данной статье в рамках многостороннего рассмотрения экологических проблем. Многостороннее (целостное) рассмотрение – перевод англоязычного термина *integrated assessment* (а также *integrated assessment modeling*), под которым имеют в виду методику анализа экологических проблем, основанную на использовании математического моделирования и направленную на получение знаний, помогающих при принятии решений о выборе разумных вариантов воздействия на природные системы (например, [1]). Этот термин отражает, по крайней мере, три требования к методике исследования. Во-первых, требуется построить интегрированную математическую модель на основе объединения результатов исследований, полученных в различных областях науки. Необходимость такого интегрирования знаний

и моделей возникает в связи с тем, что природные системы изучаются различными науками, имеющими разные подходы к моделированию систем. Более того, поскольку воздействие на природные системы осуществляется, в основном, в связи с производственной деятельностью (в широком смысле этого слова), можно говорить о производственно-экологических проблемах, изучение которых включает моделирование производственных систем. Таким образом, в построении интегрированной модели участвуют специалисты различных отраслей науки и производства, каждый из которых использует свой язык и имеет свои подходы к математическому моделированию, что делает задачу построения и использования целостной интегрированной модели совсем непростой.

Во вторых, характерная черта экологических проблем – наличие противоречивых требований к последствиям принимаемых решений. Поэтому необходимо описать эти требования средствами математического моделирования и

¹ Работа частично поддержана Программой Президиума РАН I.5 П.

на их основе сформулировать критерии выбора решения. В третьих, модель должна быть интегрированной в том смысле, что с ее помощью должна быть установлена логическая связь рассматриваемых вариантов воздействия на природные системы с этими критериями.

Важным аспектом методики является способ поддержки принятия решений. Для поддержки принятия решений в экологических проблемах могут применяться различные подходы. Широкое распространение получил подход, в рамках которого модели служат для расчета значений критериев для конечного числа вариантов воздействия на природную систему. В результате проведения расчетов каждому из возможных вариантов оказываются сопоставлены набор значений критериев и, возможно, графики изменения во времени различных показателей функционирования системы [1]. Предполагается, что такая информация достаточна для сравнения вариантов решения о развитии системы и выбора наиболее подходящего варианта воздействия на нее.

В данной работе используется альтернативный способ поддержки принятия решений. Он разработан в рамках методики целостного рассмотрения экологических проблем, предложенной в [2, 3] и развитой в [4, 5]. В рамках этой методики поддержка принятия решений основана на предоставлении заинтересованным лицам информации о возможных разумных компромиссах между противоречивыми требованиями, выдвигаемыми к производственным и экологическим показателям, на основе которых строятся критерии выбора решения. Информация представляется в графическом виде, а именно, аппроксимируется и визуализируется множество достижимых целей – совокупность достижимых сочетаний значений критериев, которые могут быть реализованы с помощью допустимых решений. Наибольший интерес при принятии решений имеют так называемая неулучшаемая граница (граница Парето) этого множества, которая содержит те достижимые цели, которые не могут быть улучшены хотя бы по одному критерию без ухудшения значения хотя бы одного из других критериев, а также решения, приводящие к точкам границы Парето (эффективные решения). Таким образом, граница Парето множества достижимых целей – это та информация о потенциальных возможностях выбора, которая в агрегированном виде

дает представление о совокупности эффективных решений. В рамках используемой методики [4, 5] эта информация дается в графическом виде.

Множество достижимых целей строится заранее с использованием интегрированной модели, поэтому его граница Парето может быть изображена по запросу заинтересованных лиц практически мгновенно. Важно, что по построенному множеству достижимых целей любое заинтересованное лицо может получить объективную информацию об этой границе независимо от других лиц, участвующих в принятии решений. При этом не требуется сообщать сведения о своих предпочтениях: благодаря визуализации множества достижимых целей пользователь получает наглядную информацию о том, какие сочетания критериев возможны, а какие – нет. В то же время, заинтересованное лицо может, при желании, указать на границе Парето предпочтительное (для этого лица) реализуемое сочетание критериев и получить соответствующее эффективное решение проблемы (такой способ выбора решений получил название метода достижимых целей [6, 7]). Таким образом, на основе визуализации границы Парето можно организовать содержательную дискуссию о предпочтительной реализуемой компромиссной цели и о выборе эффективного решения.

Описанная методика была ранее использована при разработке методов поддержки принятия решений в ряде производственно-экологических проблем различного масштаба, начиная от локальных сельскохозяйственных проблем до межстрановых проблем кислотных дождей и борьбы с глобальным потеплением [6]. Применение методики для практической выработки решений связано с управлением качеством воды в больших реках [8], выбором вариантов развития речного бассейна [9], выбором правил управления отдельной ГЭС [10] и каскада водохранилищ [11]. В данной статье методика применяется для поддержки принятия стратегических решений о долгосрочной цели в проблеме использования водных ресурсов Волги.

В рамках методики учитываются противоречивые требования к использованию водных ресурсов Волги. С одной стороны, это требование улучшить состояние экосистемы, восстановить рыбное и сельское хозяйство, а также обеспечить нормальные условия проживания населения Волго-Ахтубинской поймы. С другой стороны, требуется сохранить природную

среду, обеспечить функционирование энергетики и других отраслей экономики, а также систем жизнеобеспечения в регионах, расположенных на берегах водохранилищ Волго-Камского каскада. На основе анализа множества достижимых целей для критериев, соответствующих этим требованиям, выявлены объективные причины систематического невыполнения указаний государственных органов об обеспеченности выполнения требований к показателям функционирования водного хозяйства бассейна Волги. Построенная граница Парето дает наглядное представление об эффективных вариантах стратегического компромисса между противоречивыми требованиями.

Содержание статьи таково. В разделе 1 описывается используемая нами концепция многостороннего (целостного) рассмотрения эколого-экономических проблем, включающая в себя поддержку выбора решений. В разделе 2 рассматривается задача выбора достижимой стратегической цели в проблеме эффективного использования водных ресурсов Волги и описывается математическая модель, используемая при поддержке принятия решения в этой задаче. В разделе 3 описывается применение методики в проблеме эффективного использования водных ресурсов Волги с учетом обеспечения требований водного хозяйства Волго-Ахтубинской поймы.

1. Методика многостороннего рассмотрения экологических проблем

Методика многостороннего (целостного) рассмотрения экологических проблем, предложенная в [2-5], направлена на поддержку принятия стратегических решений о предпочтительном компромиссе между противоречивыми требованиями производственно-экологических систем, среди которых существенную роль играют экологические требования. В рамках методики, прежде всего, должна быть построена интегрированная математическая модель, дающая возможность рассмотреть широкий класс возможных решений, с которыми связаны основные аспекты рассматриваемых проблем. Модель должна позволить оценить степень выполнения требований для различных вариантов стратегических решений о развитии системы.

Интеграция математических моделей процессов различной природы в рамках используемой методики осуществляется на основе объединения упрощенных описаний отдельных подсистем, из которых состоит изучаемая система. Такие упрощенные описания могут быть результатом исследования подробных моделей или основываться на эмпирических данных и неформализованных знаниях экспертов. Таким образом, строится математическая модель, описывающая изучаемую проблему в целом, хотя, может быть, и довольно грубо. Важно, чтобы модель не содержала деталей, которые не важны при принятии стратегических решений. Вопросы построения моделей в рамках используемой методики подробно рассмотрены в [5, 12].

Рассматривая проблему поддержки принятия решений в какой-либо практической задаче, важно обсудить вопрос об участниках процесса принятия решения. Поскольку экологические проблемы сами по себе сложны и, кроме того, связаны с воздействием человека на природные системы, в процессе принятия решения участвуют не только лица, которым формально делегированы полномочия принимать рассматриваемое стратегическое решение, но и специалисты различных профессий, занимающиеся изучением рассматриваемой проблемы с разных точек зрения. Далее, принимаемые решения затрагивают интересы лиц, связанных с производственными и региональными аспектами, эти лица также могут использовать имеющиеся у них возможности для воздействия на результат принятия решения. Наконец, люди, не занимающие высоких должностей, но проживающие в регионах, на экологию и экономическое развитие которых могут воздействовать принимаемые решения, также могут стремиться оказать влияние на выбор решения. Таким образом, в ситуации, для которой предназначена используемая методика, принимаемое решение является компромиссом, каким-то образом достигаемым участниками процесса, а поддержка принятия решения требуется всем его участникам. Это накладывает ограничения на метод, пригодный для поддержки принятия решений в данной задаче.

Метод поддержки принятия решений, используемый в рамках описываемой методики, имеет следующую математическую формулировку. Пусть варианты решения могут быть представлены в виде векторов $x = (x_1, \dots, x_n)$,

являющихся элементами линейного пространства R^n . Предполагается, что заранее задано множество $X \subset R^n$ допустимых (возможных) решений, среди которых следует искать наиболее подходящее решение. Противоречивые требования, предъявляемые к воздействиям на производственно-экологическую систему, порождают набор критериев выбора решения. В связи с отсутствием единственного критерия выбора решения, основой средств поддержки принятия решения является многокритериальная оптимизация.

Пусть рассматривается m противоречивых критериев выбора решения, набор которых можно трактовать как m -мерный вектор $y \in R^m$. Предполагается, что задана (может быть, в виде компьютерной программы) вектор-функция $f(x)$, имеющая m компонент и позволяющая для каждого допустимого решения x рассчитать соответствующий вектор критериев, который также можно считать точкой R^m . Множество всех критериальных векторов, достижимых с использованием допустимых решений, часто называемое множеством достижимых целей, имеет вид

$$Y = \{y \in R^m : y = f(x), x \in X\}. \quad (1)$$

Для определенности будем рассматривать задачу многокритериальной максимизации, т.е. будем считать, что желательно увеличение значения каждого из критериев в отдельности (при равных значениях остальных критериев). Тогда из $y' \geq y$ и $y' \neq y$ следует, что критериальный вектор y' более предпочтителен, чем вектор y (принято говорить, что вектор y' доминирует вектор y по Парето). Решением задачи многокритериальной максимизации является недоминируемая граница (она же неулучшаемая граница и граница Парето) множества Y , математически определяемая как

$$P(Y) = \{y \in Y : \{y' \in Y : y' \geq y, y' \neq y\} = \emptyset\} \quad (2)$$

Как уже говорилось, эту границу называют неулучшаемой потому, что нельзя улучшить значение одного из критериев без ухудшения значения хотя бы одного другого, не выходя за пределы множества достижимых целей Y . В связи с этим при рациональном принятии ре-

шения наиболее предпочтительное сочетание критериев следует искать среди точек границы Парето. В реальной жизни активность лиц с различными интересами, участвующих тем или иным образом в принятии решений в производственно-экологических проблемах, приводит к принятию некоторого решения. При этом интересы некоторых групп людей могут вообще не учитываться, а результаты принятого решения могут не лежать на границе Парето. В дальнейшем будем предполагать, что все признанные обществом интересы отражены в критериях задачи. Целью метода поддержки принятия решения, используемого в описываемой методике, является обеспечение того, что выбранное сочетание значений критериев принадлежит границе Парето, причем выбор этой точки осуществляется на основе компромисса между теми интересами, которые решено принимать во внимание. Для этого предлагается визуализировать границу Парето, что обеспечивает представление информации о ней в форме, доступной для участников процесса принятия решения.

В последние годы направление методов многокритериальной оптимизации, основанное на аппроксимации границы Парето, стало ведущим в многокритериальной оптимизации, по этой тематике опубликовано несколько тысяч работ (например, [13]). Диалоговая визуализация границы Парето является основным отличием метода, используемого в рамках описываемой методики многостороннего рассмотрения экологических проблем. Для реализации диалоговой визуализации границы Парето разработан метод диалоговых карт решений (ДКР) [7, 14]. Основной идеей этого метода, определяющей возможность эффективной диалоговой визуализации границы Парето в случае более чем двух критериев, является то, что аппроксимируется не сама граница, а так называемая оболочка Эджворта-Парето (ОЭП) множества Y , определяемая в задаче многокритериальной максимизации как $Y^* = Y + (-R_+^m)$, где R_+^m – неотрицательный конус пространства R^m . Другими словами:

$$Y^* = \{y \in R^m : y \leq f(x), x \in X\}. \quad (3)$$

Имеет место $P(Y^*) = P(Y)$, причем Y^* является максимальным множеством, имеющим ту же границу Парето, что и множество Y . Благодаря этому, визуализация Y^* позволяет пользо-

вателям получить информацию о многомерном множестве $P(Y)$. Преимущество аппроксимации множества Y или Y^* (вместо непосредственной аппроксимации $P(Y)$) состоит в том, что задача аппроксимации Y^* обычно является поставленной корректно, в то время как граница Парето часто неустойчива по отношению к возмущениям [15], что делает задачу ее аппроксимации некорректной. Преимущество аппроксимации Y^* вместо Y основано также на том, что структура границы Y^* проще, чем структура границы Y : доминируемые границы Y , мешающие визуализации этого множества при $m > 2$, исчезают при переходе к Y^* . Также важно, что аппроксимация Y^* является более простой задачей, чем аппроксимация Y .

Информирование заинтересованных лиц осуществляется так: на дисплее изображаются двумерные сечения ОЭП, неуплучшаемые границы которых представляют наибольший интерес (они часто называются компромиссными кривыми). Как правило, неуплучшаемые границы сечений ОЭП являются сечениями $P(Y)$. Практика показала, что для пользователей особенно удобно использовать карты решений – такие наборы двумерных сечений ОЭП, в которых от сечения к сечению меняется только одна координата вектора критериев.

В случае более чем трех критериев, на дисплее можно отображать несколько карт решений. Предварительная аппроксимация ОЭП позволяет быстро изображать различные карты решений по заказу пользователя. Можно осуществить компьютерную анимацию карт решений и их совокупностей в соответствии с изменениями значений критериев, не отображенных на картах. В этом случае аппроксимация ОЭП становится источником различных виртуальных анимационных фильмов, позволяющих получить информацию о многомерной границе Парето просто и в наглядной форме наборов компромиссных кривых. Исследуя различные карты решений, их совокупности и компьютерные анимационные фильмы, пользователь получает наглядную информацию о потенциальных возможностях выбора решения и о связи между значениями критериев на границе Парето. Понимание потенциальных возможностей выбора и связи между критериями помогает прийти к согласованному решению в случае нескольких лиц, ответственных за принятие решений (подробнее в [16]).

Любой участник процесса принятия решений может указать предпочтительную точку (достижимую цель) на границе прямо на экране компьютера. По достижимой цели можно построить допустимое решение. Как уже говорилось, такой подход к выбору решения получил название метода достижимых целей (МДЦ). Далее, полученные решения могут быть обсуждены и на основе анализа границы Парето построено компромиссное решение. Итак, используемый нами подход к решению задачи многокритериальной оптимизации, основанный на методе достижимых целей и диалоговых картах решений (МДЦ/ДКР), состоит в аппроксимации ОЭП, анализе границы Парето с помощью диалоговой визуализации ОЭП в виде компромиссных кривых и в указании предпочтительной точки.

Наиболее вычислительно сложной проблемой использования МДЦ/ДКР является проблема аппроксимации ОЭП. В конце XX века задача аппроксимации ОЭП была с успехом реализована для линейных моделей, для которых множества Y и Y^* выпуклы [6, 7, 13]. Были разработаны мощные адаптивные алгоритмы аппроксимации этих множеств, благодаря чему диалоговая визуализация границы Парето была использована в ряде прикладных систем поддержки принятия решений, в том числе и в области управления водными ресурсами [8, 9].

Интенсивные исследования в области аппроксимации и визуализации ОЭП в нелинейном случае начались в XXI-м веке. Для нелинейных систем ОЭП обычно является невыпуклым. В этом случае ОЭП аппроксимируется объединением конечного числа конусов $y + (-R_+^m)$ с вершинами в точках $y \in Y$, в какой-то степени близких к $P(Y)$. Это множество задает внутреннюю аппроксимацию ОЭП. Методы [17, 18, 11], используемые МДЦ/ДКР в нелинейном случае, предназначены для аппроксимации ОЭП в задачах с сотнями переменных и числом критериев от двух до девяти, причем нелинейная математическая модель, характеризующая множество X и отображение $y=f(x)$, может быть задана в виде вычислительного модуля. Эти методы основаны на синтезе методов глобального случайного поиска, локальной оптимизации, сжатия области поиска и генетических методах многокритериальной оптимизации. Для такой сложной задачи, как обеспечение водными ресурсами природной

системы Волго-Ахтубинской поймы, потребовалось развить методы декомпозиции задач аппроксимации ОЭП [19]. В таких методах задача разбивается на подзадачи аппроксимации ОЭП для подсистем и на дальнейшем использовании результатов, полученных для подсистем, для аппроксимации ОЭП системы в целом.

2. Формулировка проблемы и описание модели

Описанная выше методика применяется в данной статье при поддержке принятия стратегических решений по проблеме обеспечения водными ресурсами Волго-Ахтубинской поймы, являющейся экологическим объектом мирового значения. Водные ресурсы могут быть получены в результате управления водохранилищами Волго-Камского каскада, что приводит к необходимости принимать во внимание вопросы управления каскадом в целом. В настоящее время в бассейне Волги функционируют 9 крупных водохранилищ. Ввод в действие каскада водохранилищ вызвал уменьшение и сокращение паводков, поскольку требуется наполнить водохранилища в период весеннего половодья. Наполнение водохранилищ в период паводка необходимо в связи с тем, что более 60% годового стока Волги приходится на половодье, а оставшиеся 40% приходятся на остальную часть года, когда естественный сток требуется дополнять водой водохранилищ, в основном, с целью производства электроэнергии и обеспечения судоходства по реке.

Регулировка стока привела к значительному изменению параметров половодья в Волго-Ахтубинской пойме, поступлением воды в которую регулируется Волгоградским гидроузлом. В результате изменения стока был нанесен существенный ущерб экологической системе поймы и основанным на использовании природных ресурсов рыбохозяйственной и сельскохозяйственной отраслям. В частности, под воздействием этого и других факторов, в значительной степени уменьшилась продуктивность рыбного стада. Несмотря на то, в случае достаточно многоводного половодья попуски Волгоградского гидроузла обеспечивают затопление нерестилищ, длительность стояния необходимых уровней составляет сейчас не более 4-8 дней, что значительно короче, чем требуется для вызревания мальков (20-30 дней). Этот факт в значи-

тельной степени связан с недостатками организации управления водохранилищами Волго-Камского каскада. В настоящее время управление попусками водохранилищ в период половодья осуществляется межведомственной оперативной группой, внимание которой сконцентрировано на решении задач оперативного управления. Точнее говоря, оперативная группа в реальном времени с учетом текущих гидрологических условий и прогнозов приточности принимает решения о значениях попусков на ближайшие периоды времени. Основные задачи оперативной группы – обеспечить безопасное прохождение паводка через водохранилища и наполнение водохранилищ к концу паводка. Важность первой задачи очевидна, а наполнение водохранилищ гарантирует обеспечение водными ресурсами электроэнергетики, рыбной, сельскохозяйственной и других производственных отраслей, коммунального водопользования, судоходства, а также нормального экологического состояния водохранилищ каскада. Поскольку в нормальной работе этих отраслей производства, коммунального хозяйства и поддержке удовлетворительного состояния окружающей среды заинтересованы представители производственных отраслей и администрации регионов, расположенных в Волго-Камском бассейне, к наполнению водохранилищ привлечено основное внимание межведомственной оперативной группы, а проблемы Волго-Ахтубинской поймы остаются в тени. Для сохранения уникальной экосистемы поймы необходимо изменение подходов к управлению водными ресурсами Волго-Камского бассейна и учет долгосрочных задач, стоящих перед системой управления водными ресурсами бассейна. Целью нашего исследования является разработка таких подходов к управлению стоком Волги, в которых учитывались бы потребности Волго-Ахтубинской поймы. В данной статье рассматривается задача долгосрочного стратегического планирования, в рамках которой принимаются принципиальные решения о компромиссе между противоречивыми требованиями к водным ресурсам Волго-Камского каскада. Вопросы реализации долгосрочных целей в рамках оперативного управления будут рассмотрены в отдельной статье.

В рамках нашего исследования используется следующая интегрированная математическая модель Волго-Камского каскада. В модели рассматриваются 9 больших водохранилищ, номе-

ра которых обозначены через i : $i=1$ – Рыбинское; $i=2$ – Горьковское, $i=3$ – Чебоксарское, $i=4$ – Камское, $i=5$ – Воткинское, $i=6$ – Нижнекамское, $i=7$ – Куйбышевское, $i=8$ – Саратовское, $i=9$ – Волгоградское водохранилище. Обозначим через t номер водохозяйственного года, начинающегося 1 апреля и завершающегося 31 марта, $t = 1, \dots, T$. Водохозяйственный год разбивается на три характерных интервала времени, номер интервала обозначим через j ($j = 1$ – половодье, $j = 2$ – летне-осенняя межень, $j = 3$ – зимняя межень). Половодье продолжается с 1 апреля по 30 июня, летне-осенняя межень – с 1 июля по 31 октября; зимняя межень – с 1 ноября по 31 марта. Обозначим через τ_1, τ_2, τ_3 число дней в характерных интервалах, соответственно ($\tau_1 = 91, \tau_2 = 123, \tau_3 = 151$).

Для уровней воды в водохранилищах принято рассматривать следующие характерные значения: УМО – уровень мертвого объема, при уровне воды ниже которого попуск воды из водохранилища невозможен; УПС – уровень обязательной предполоводной сработки водохранилища; НПУ – нормальный подпорный уровень, соответствующий проектному максимальному производству электроэнергии. Обозначим через $Z_{\text{УМО}}^i$ – уровень воды верхнего бьефа i -го водохранилища при УМО, через $Z_{\text{УПС}}^i$ – уровень воды верхнего бьефа i -го водохранилища при УПС, через $Z_{\text{НПУ}}^i$ – уровень воды верхнего бьефа i -го водохранилища при НПУ. Обозначим через $W_{\text{УМО}}^i$ – объем воды в i -м водохранилище при $Z_{\text{УМО}}^i$, через $W_{\text{УПС}}^i$ – объем воды в i -м водохранилище при $Z_{\text{УПС}}^i$, через $W_{\text{НПУ}}^i$ – объем воды в i -м водохранилище при $Z_{\text{НПУ}}^i$. Объем воды в i -м водохранилище на начало j -го интервала в водохозяйственном году t , обозначаемый через $W_{j,t}^i$, связан с уровнем верхнего бьефа этого водохранилища $Z_{j,t}^i$ в этот момент времени заданной батиметрической функцией $Z_{j,t}^i = z_i(W_{j,t}^i)$. Кроме того, заранее задана зависимость $H_{j,t}^i = h_i(Q_{j,t}^i, Z_{j,t}^{i+1})$ уровня нижнего бьефа i -го водохранилища на начало j -го интервала года t от среднего расхода воды $Q_{j,t}^i$ в течение j -го интервала года t и от $Z_{j,t}^{i+1}$ – уровня верхнего бьефа $i+1$ -го водохранилища, расположенного ниже i -го водохранилища по течению реки, в начале j -го интервала года t .

Через $R_{j,t}^i, i = 1, \dots, 9, j=1, 2, 3, t = 1, \dots, T$, обозначен суммарный объем попуска i -го водохранилища за j -й интервал года t , а через $B_{j,t}^i$ – суммарный объем бокового притока к i -му водохранилищу (для 1-го и 4-го водохранилищ –

приток сверху) за j -й интервал года t . Балансовые уравнения динамики объемов воды в водохранилищах имеют вид:

А) для Рыбинского и Камского водохранилищ ($i = 1, 4$)

$$W_{2,t}^i = W_{1,t}^i + B_{1,t}^i - R_{1,t}^i \quad (4)$$

$$W_{3,t}^i = W_{2,t}^i + B_{2,t}^i - R_{2,t}^i \quad (5)$$

$$W_{1,t+1}^i = W_{3,t}^i + B_{3,t}^i - R_{3,t}^i; \quad (6)$$

Б) для Куйбышевского водохранилища (для $i = 7$)

$$W_{2,t}^i = W_{1,t}^i + B_{1,t}^i + R_{1,t}^3 + R_{1,t}^6 - R_{1,t}^i \quad (7)$$

$$W_{3,t}^i = W_{2,t}^i + B_{2,t}^i + R_{2,t}^3 + R_{2,t}^6 - R_{2,t}^i \quad (8)$$

$$W_{1,t+1}^i = W_{3,t}^i + B_{3,t}^i + R_{3,t}^3 + R_{3,t}^6 - R_{3,t}^i; \quad (9)$$

С) для остальных водохранилищ

$$W_{2,t}^i = W_{1,t}^i + B_{1,t}^i + R_{1,t}^{i-1} - R_{1,t}^i \quad (10)$$

$$W_{3,t}^i = W_{2,t}^i + B_{2,t}^i + R_{2,t}^{i-1} - R_{2,t}^i \quad (11)$$

$$W_{1,t+1}^i = W_{3,t}^i + B_{3,t}^i + R_{3,t}^{i-1} - R_{3,t}^i \quad (12)$$

Принимаемые решения состоят в выборе величин $R_{j,t}^i, i = 1, \dots, 9, j=1, 2, 3, t=1, \dots, T$, т.е. объемов попуска воды в нижний бьеф водохранилищ. Эти решения должны быть таковы, чтобы при заданных объемах приточности $B_{j,t}^i$ (вопрос о задании приточности рассмотрен ниже) удовлетворялись ограничения

$$W_{\text{УПС}}^i \leq W_{1,t+1}^i \leq W_{\text{НПУ}}^i, t=1, 2, \dots, \quad (13)$$

$$W_{\text{УМО}}^i \leq W_{j,t+1}^i \leq W_{\text{НПУ}}^i, t=1, 2, \dots, j=2, 3. \quad (14)$$

Кроме того, должны выполняться ограничения снизу на попуск в каждый из периодов (должен быть осуществлен так называемый санитарный попуск):

$$R_{j,t}^i \geq R_{j, \text{сан.пол.}}^i, \quad (15)$$

где $R_{j, \text{сан.пол.}}^i$ – объем санитарного попуска в нижний бьеф i -го водохранилища в j -й интервал. Считается, что объемы воды в водохранилищах в начале рассматриваемого периода времени удовлетворяют соотношению

$$W_{1,t}^i = W_{\text{УПС}}^i, i = 1, \dots, 9. \quad (16)$$

Одним из важнейших показателей функционирования Волго-Камского каскада является производство электроэнергии в зимнюю межень (с ноября по март), поэтому модель включает описание производства электроэнергии в этот период времени. Значения мощности ГЭС i -го водохранилища в году t в начале и конце

зимней межени, обозначаемые $N_{3,t}^i$ и $N_{1,t+1}^i$, соответственно, при среднем расходе воды в зимнюю межень $Q_{3,t}^i$ описываются соотношениями

$$\begin{aligned} N_{3,t}^i &= m^i (Z_{3,t}^i - H_{3,t}^i) Q_{3,t}^i, \\ N_{1,t+1}^i &= m^i (Z_{1,t+1}^i - H_{1,t+1}^i) Q_{3,t}^i \end{aligned} \quad (17)$$

где m^i – некоторые известные постоянные, $i=1, \dots, 9$. Средняя мощность в зимнюю межень в году t , суммарная по всем водохранилищам каскада, описывается соотношением

$$N_t = (\sum_i N_{3,t}^i + \sum_i N_{1,t+1}^i) / 2. \quad (18)$$

Величина среднего расхода $Q_{j,t}^i$ в соотношении (17) связана с попуском $R_{j,t}^i$ соотношением

$$Q_{j,t}^i = R_{j,t}^i / (86400 * \tau_j), \quad i=1, \dots, 9, j=1, 2, 3. \quad (19)$$

В исследовании учитывались следующие требования основных водопользователей:

1. Наполнение водохранилищ каскада до уровня НПУ к концу половодья.

2. Средняя суммарная мощность N_t всех ГЭС каскада в зимнюю межень (с декабря по март) не должна быть меньше некоторой заданной величины.

3. Транспортный попуск в нижний бьеф Волгоградского гидроузла в летне-осеннюю межень $Q_{2,t}$ не должен быть менее некоторой заданной величины.

4. Попуск в нижний бьеф Волгоградского гидроузла за половодье $R_{1,t}$ не должен быть меньше некоторой заданной величины. Этот попуск также отражает экологические, рыбохозяйственные, транспортные (в половодье) и санитарные требования. В частности, он обеспечивает достаточно долгое стояние уровней воды в нерестилищах.

В качестве критериев, используемых при принятии решения, были использованы величины так называемой обеспеченности перечисленных требований. Под обеспеченностью выполнения некоторого требования понимают отношение числа лет, в течение которых требование было выполнено, к общему числу лет некоторого достаточно продолжительного периода времени, для которого производился расчет обеспеченности. Обеспеченность является обычным критерием выбора решения при планировании водных систем, она постоянно используется специалистами-водохозяйственниками и официально утверждена приказом Минприроды России [20].

В нашем исследовании рассматривался период в 98 лет с 1916 по 2013 годы, для которого

имеется информация о приточности $V_{j,t}^i$, $i=1, \dots, 9$, $j=1, 2, 3$, $t=1, \dots, T$, водохранилищ Волго-Камского каскада. Таким образом, для любого варианта управления $R_{j,t}^i$, $i=1, \dots, 9$, $j=1, 2, 3$, $t=1, \dots, T$, удовлетворяющего соотношениям модели (4)-(19), можно рассчитать значения критериев, равных обеспеченности четырех рассмотренных требований, а именно:

1. Обеспеченность наполнения всех водохранилищ до уровня НПУ к концу половодья (сокращенно NPU).

2. Обеспеченность требуемой отдаваемой мощности ГЭС каскада в зимнюю межень (сокращенно PGarant).

3. Обеспеченность требуемого транспортного попуска в нижний бьеф Волгоградского гидроузла в летне-осеннюю межень (сокращенно Transp).

4. Обеспеченность требуемого эколого-рыбохозяйственного попуска в нижний бьеф Волгоградского гидроузла в половодье (сокращенно Ecol).

Значения четырех рассматриваемых критериев, соответствующую некоторому допустимому варианту попусков $R_{j,t}^i$, $i=1, \dots, 9$, $j=1, 2, 3$, можно интерпретировать как достижимую точку в пространстве критериев. Вычислительных алгоритмы метода МДЦ/ДКР позволяют по уравнениям модели построить совокупность достижимых критериальных точек, порождаемых всеми допустимыми вариантами попуска, т.е. множество достижимых целей.

Обратим внимание на то, что использование информации о приточности водохранилищ на весь рассматриваемый период означает, что построение границы Парето происходит в условиях полной информации. Это делается для того, чтобы, как это полагается в рамках многостороннего (целостного) рассмотрения экологических проблем, анализ основной задачи выбора компромиссной достижимой стратегической цели управления водными ресурсами бассейна не затемнять одновременным рассмотрением сложных проблем прогнозирования приточности. Это накладывает некоторые ограничения на интерпретацию множества достижимых целей, построенного при таком подходе.

3. Применение методики для поддержки принятия решения

В данном разделе описывается применение методики для поддержки принятия стратегиче-

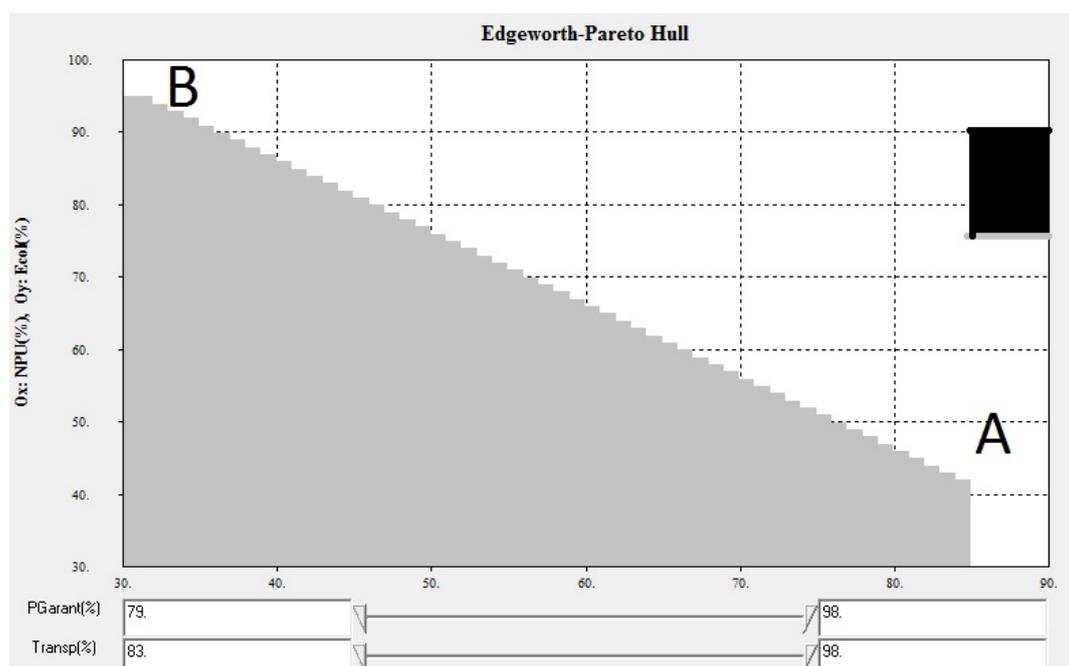


Рис. 1. Сравнение неуправляемой границы для NPU и Ecol и указаний Минприроды РФ

ского решения о компромиссной достижимой цели, т.е. о сочетании критериев обеспеченности описанных выше требований к долгосрочному управлению Волго-Камским каскадом. В соответствии с утвержденными правилами использования водных ресурсов водохранилищ каскада, дополнительно предполагалось, что перед началом паводка уровень всех водохранилищ должны быть равен УПС

$$W_{l,t+1}^i = W_{\text{УПС}}^i, \quad i=1, \dots, 9, \quad t=1, 2, \dots, \quad (20)$$

Вычислительные алгоритмы метода МДЦ/ДКР применяются для построения множества достижимых целей для четырех критериев рассматриваемой задачи по соотношениям модели (4)-(20). Как уже говорилось, для рассматриваемом случае были использованы методы декомпозиции задачи построения оболочки Эджворта-Парето (ОЭП), применение которых для модели (4)-(20) описано в [19]. Информирование пользователей о границе Парето проводится на основе изображения двумерных сечений этого множества.

На Рис. 1 серым цветом дано сечение ОЭП множества достижимых целей, параллельное плоскости критериев NPU и Ecol. Значения NPU даны на горизонтальной оси, значения Ecol – на вертикальной. Поскольку представляет интерес максимизация обоих критериев, неуправляемой границей сечения является его северо-восточная

граница. Диапазоны значений критериев PGarant и Transp, для которых построено изображенное сечение ОЭП, задаются слайдерами на прокрутках, расположенных под картой решений. В рассматриваемом случае диапазон PGarant и Transp, установленный на прокрутках под сечением, не ограничен пользователем с помощью слайдеров, т.е. эти критерии могут принимать любые достижимые значения. Диапазон значений PGarant – от 79% до 98%, диапазон значений Transp – от 83% до 98%.

Кроме множества достижимых целей, на Рис. 1 изображен прямоугольник темного цвета, отражающий (в терминах критериев NPU и Ecol) указания Минприроды РФ по обеспеченности требований водопользователей [20], которые для гидроэнергетики равны 85-95%, для судоходства – 85-90 %, для рыбного хозяйства и сельскохозяйственного обводнения – 75-90%.

Как показывает многолетняя практика, в настоящее время эти указания не выполняются, причем практически в каждый маловодный или средний по водности год возникает конфликт между требованиями заполнения водохранилищ и обеспечения потребностей Волго-Ахтубинской поймы. Рис. 1 позволяет проанализировать вопрос о том, можно ли, в принципе, удовлетворить приведенные выше требования по обеспеченности при действующих правилах управления (20).

В точке А неулучшаемой границы сечения достигается максимальное значение критерия NPU (составляет 85%), причем величина критерия Ecol этой точке составляет около 42%. Наоборот, при больших значениях критерия Ecol (около 90% в точке В) величина NPU не превосходит 40%. Точки А и В карты решений соединены ломаной линией, которая является неулучшаемой границей для этих двух критериев. Как видно на Рис. 1, темный прямоугольник не имеет общих точек с множеством достижимых целей по критериям NPU и Ecol, хотя каждый из критериев по отдельности может удовлетворять установленным требованиям. Например, в точке, в которой обеспеченность экологических требований равна минимальным требованиям методических указаний (75%), обеспеченность наполнения водохранилищ до НПУ равна только 52%, что существенно отклоняется от требований. Обратим внимание на то, что требования методических указаний не выполняются при всевозможных значениях критериев PGarant и Transp. Таким образом, рассмотрение множества достижимых целей, построенного для указанных критериев, объясняет тот известный из практики факт, что не удается одновременно удовлетворить требования всех водопользователей бассейна Волги с указанной обеспеченностью.

Как уже подчеркивалось, что множество достижимых целей построено при предположении, что приточность на период расчета обеспеченности известна заранее. Поэтому граница обеспеченности, изображенная на Рис. 1, является оценкой сверху для обеспеченностей, которые могут быть достигнуты в условиях неточного прогноза приточности. При увеличении точности прогноза совокупность достижимых сочетаний обеспеченностей наполнения водохранилищ и пусков Волгоградского гидроузла в половодье может приближаться к границе, изображенной на Рис. 1, но не может выходить за ее пределы. Поэтому полученный вывод о том, что указаниями Минприроды не могут быть выполнены одновременно, верен при любой точности прогноза. Таким образом, тот факт, что эти указания не выполняются, связан с объективной нехваткой водных ресурсов при выполнении правила (20), а не только с процедурой управления пусками воды через плотины водохранилищ.

В связи с полученным выводом возникают две задачи: задача поддержки выбора компромисс-

ной стратегической цели относительно обеспеченности рассматриваемых требований при выполнении правила (20) и задача изучения вопроса о том, что будет при модификации этого правила. Для решения первой задачи в рамках используемого метода МДЦ/ДКР рассматривается достаточное число различных карт решений, представляемых в диалоговом режиме. Такой анализ позволяет пользователям всесторонне изучить связь между критериями и предложить решение, отражающее их предпочтения. Приведем пример анализа карты решений.

На Рис. 2 приведена черно-белая копия цветной карты решений, содержащей более чем одно сечение ОЭП. По-прежнему значения NPU даны на горизонтальной оси, значения Ecol – на вертикальной оси. Различные сечения, приведенные на Рис. 2, относятся к разным значениям критерия Transp и даны различными оттенками серого (цветом на экране компьютера). Соответствие между оттенком серого и интервалом величин Transp указано в шкале, расположенной справа от карты решений. Так, самый светлый оттенок соответствует диапазону значений Transp от 96% до 97%, а самый темный – от 90% до 91%. Как видно, с уменьшением значения Transp область достижимых значений NPU и Ecol несколько расширяется, причем влияние Transp на множество достижимых целей сказывается только при больших значениях Ecol. Влияние PGarant по-прежнему изучается с помощью прокрутки. На Рис. 2 значения PGarant находятся в диапазоне от 85% до 98%.

На границе Парето, сечения которой приведены на Рис. 2, можно проанализировать несколько характерных точек. Так, в точке А величины обеспеченности принимают следующие значения: NPU= 85%, PGarant= 88%, Transp= 96%, Ecol = 42%. В точке В величины обеспеченности принимают следующие значения: NPU= 38%, PGarant= 85%, Transp=96%, Ecol = 89%. Можно также рассмотреть «сбалансированную» достижимую цель с обеспеченностью наполнения водохранилищ до НПУ не менее 70% (точка С). Здесь NPU= 70%, PGarant= 88%, Transp= 96%, Ecol = 57%. Значения обеспеченности в точке С как по наполнению водохранилищ до НПУ, так и для эколого-рыбохозяйственного пускa не удовлетворяют требованиям Минприроды. Анализ Рис. 2 и других карт решений показывает, что если не переходить в область крайне малых значений обеспеченности наполнения водохранилищ

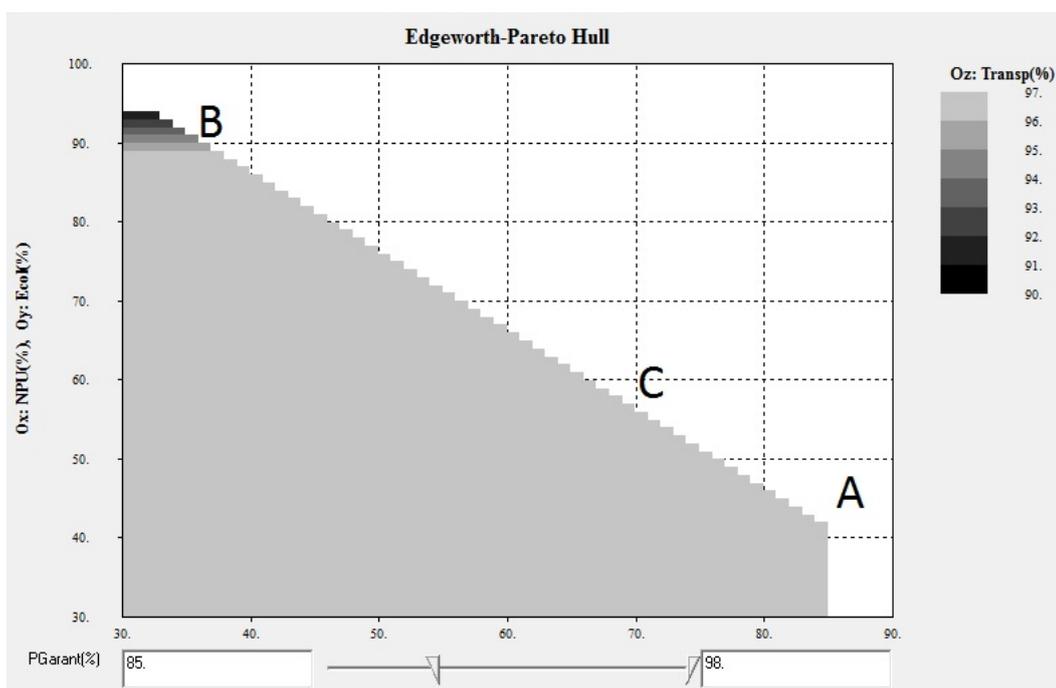


Рис. 2. Черно-белая копия цветной карты решений

до НПУ (менее 40%), то конфликт, по существу, имеет место только между критериями NPU и Ecol. Лица, которым доверено право принимать решения по этому вопросу, должны найти компромисс между обеспеченностью наполнения водохранилищ и эколого-рыбохозяйственным попуском в нижний бьеф Волгоградского гидроузла, приняв, тем самым, стратегическое решение об управлении водными ресурсами бассейна Волги. Как уже было сказано, для этого в дополнение к карте решений Рис. 2 надо рассмотреть большое число других карт решений с разным расположением критериев на осях, прокрутках и шкалах.

Второй из задач, возникших в результате изучения неулучшаемой границы на Рис. 1, была следующая: можно ли удовлетворить требования, установленные методическими указаниями [20], при отказе от правила (20), состоящего в том, что перед началом паводка все водохранилища должны быть сработаны до УПС. По мнению некоторых специалистов, отмена правила (20) может привести к выполнению требований методических указаний. В частности, предлагается рассмотреть переход на переменную предпаводную сработку водохранилищ. Конечно, для этого должен быть обеспечен достаточно точный прогноз приточности.

В нашем исследовании изучалась следующая постановка: при необходимости можно было увеличить объем воды в водохранилищах в начале водохозяйственного года до альтернативного максимального объема по сравнению с установленным в настоящее время уровнем УПС. Точнее говоря, вместо соотношения (20) было использовано соотношение

$$W_{УПС}^i \leq W_{1,t+1}^i \leq \hat{W}_{УПС}^i, i=1, \dots, 9, t=1, 2, \dots, \quad (21)$$

где $\hat{W}_{УПС}^i, i=1, \dots, 9$, – альтернативный максимальный объем воды в i -м водохранилище перед началом половодья. Для нескольких вариантов величины $\hat{W}_{УПС}^i, i=1, \dots, 9$, были построены множества достижимых целей (для тех же критериев NPU, PGarant, Transp и Ecol), на основе которых были изучены множества достижимых целей для двух критериев, аналогичные приведенному на Рис. 1. Специалисты сравнивали взаимное расположение сечения и прямоугольника методических указаний. В итоге было установлено, что требуемый результат дает дополнительный суммарный объем воды в водохранилищах в 30 км³. Приведенный пример характеризует один из возможных способов применения МДЦ/ДКР для анализа различных мероприятий по обеспечению требований к водопользованию в Волго-Камском бассейне.

Заключение

В проведенном исследовании на основе концепции многостороннего (целостного) рассмотрения эколого-экономических проблем, включающей математическое моделирование изучаемых систем, аппроксимацию оболочки Эджворта-Парето в задаче многокритериальной оптимизации и диалоговую визуализацию границы Парето, разработана методика анализа потенциальных возможностей управления водохозяйственным комплексом Волго-Камского каскада и поддержки выбора достижимых стратегических целей его функционирования. В работе установлено, что при современных правилах управления водохранилищами невозможно одновременно выполнить все указания Минприроды по обеспеченности требований основных водопользователей и что выбор компромиссной стратегической цели функционирования системы управления водохозяйственным комплексом может стать основой долгосрочного управления бассейном, обеспечивающего, в том числе, учет интересов экологического и хозяйственного развития Волго-Ахтубинской поймы. При этом стратегическая цель должна стать основой организации процесса оперативного управления бассейном. Вопрос о методах оперативного управления, реализующих стратегическую цель, выходят за пределы данной статьи, он кратко рассматривается в [21] и более подробно – в [22]. В данной статье также продемонстрировано, что разработанная методика позволяет оценить последствия перехода к модифицированным правилам управления каскадом водохранилищ.

Литература

1. Clarke L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P.R. Shukla, M. Tavoni, B.C.C. van der Zwaan, and D.P. van Vuuren. Assessing Transformation Pathways // *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 2014.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
3. Moiseev N., Aleksandrov V., Krapivin V., Lotov A., Svirezhev J., and Tarko A. Global Models. The Biospheric Approach. Collaborative paper CP-83-33. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 1983.
4. Лотов А.В. О целостном рассмотрении эколого-экономических проблем. М.: изд. ВЦ РАН, 1994.
5. 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). Kluwer Academic Publishers: Boston, 1998. P. 417-446.
6. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997.
7. 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.
8. Lotov, A.V., Bourmistrova, L.V., Efremov, R.V., Bushenkov, V.A., Buber, A.L., and Brainin, N.A. Experience of Model Integration and Pareto Frontier Visualization in the Search for Preferable Water Quality Strategies // *Environmental Modelling and Software*. 2005. Vol. 20. No. 2. P. 243-260.
9. Dietrich J., Schumann A.H., Lotov A.V. Workflow oriented participatory decision support for integrated river basin planning // A. Castelletti and R. Soncini Sessa (eds.) *Topics on System Analysis and Integrated Water Resource Management*. Elsevier: Amsterdam, 2007. P. 207-221.
10. Лотов А.В., Рябиков А.И., Бубер А.Л. Визуализация границы Парето при разработке правил управления ГЭС // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2013. № 1. С. 70-83.
11. Лотов А.В., Рябиков А.И. Многокритериальный синтез оптимального управления и его применение при построении правил управления каскадом гидроэлектростанций // *Труды Института Математики и Механики УрО РАН*. 2014. Т.20. № 4. С. 187-203.
12. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К. Метод достижимых целей. Математические основы и экологические приложения. New York, USA: Mellen Press, 1999.
13. Branke J., Deb K., Miettinen K., Slowinski R. (eds.) *Multiobjective Optimization. Interactive and Evolutionary Approaches*. Lecture Notes in Computer Science, V. 5252. Berlin-Heidelberg: Springer, 2008.
14. Lotov A.V., Bushenkov V.A., and Kamenev G.K. *Interactive Decision Maps. Approximation and Visualization of the Pareto Frontier*. Kluwer Academic Publishers: Boston, 2004.
15. Sawaragi Y., Nakayama H., Tanino T. *Theory of multi-objective optimization*. Orlando: Academic Press, 1985.
16. Lotov A., Bushenkov V., Kamenev G., Camara A., Loucks D. Water Resource Conflict Resolution Based on Interactive Tradeoffs Display // *Rehabilitation of Degraded Rivers: Challenges, Issues and Experiences* (ed. by D.P. Loucks). Kluwer Academic Publishers: Boston, 1998. P. 447-470.
17. Березкин В.Е., Каменев Г.К., Лотов А.В. Гибридные адаптивные методы аппроксимации невыпуклой многомерной паретовой границы // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2006. Т. 46. № 11. С. 2009-2023.
18. 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.

19. Лотов А.В. Декомпозиция задачи аппроксимации оболочки Эджворта-Парето // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2015. Т. 55. № 10. С. 1681-1693.
20. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ // Утверждены приказом Минприроды России от 26 января 2011 г., № 17. img.g.ru/pril/76/46/95/20655.doc
21. Болгов М.В., Бубер А.Л., Лотов А.В. Управление водными ресурсами Нижней Волги на основе информационной технологии анализа проблем обеспеченности водопользователей ВКК ГЭС // Труды четвертой Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 15-18 сентября 2015 г.), М.: ИВП РАН. 2015. С. 481-484.
22. Болгов М.В., Бубер А.Л., Лотов А.В., Комаровский А.А. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла // Водные ресурсы (в печати).

Болгов Михаил Васильевич. Заведующий лабораторией, и.о. заместителя директора Института водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН). Окончил Одесский гидрометеорологический институт в 1979 году. Доктор технических наук. Количество печатных работ: более 150, в том числе 5 монографий. Область научных интересов: гидрология, управление водными ресурсами. E-mail: bolgovmv@mail.ru

Бубер Александр Леонидович. Заведующий лабораторией Всероссийского исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ВНИИГИМ). Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1972 году. Количество печатных работ: более 30. Область научных интересов: управление водными ресурсами, гидромелиорация. E-mail: buber49@rambler.ru

Лотов Александр Владимирович. Главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ВЦ ФИЦ ИУ РАН). Окончил Московский физико-технический институт в 1969 году. Доктор физико-математических наук, профессор. Количество печатных работ: более 160, в том числе 4 монографии. Область научных интересов: принятие решений при нескольких критериях, теория управления. E-mail: avlotov@yandex.ru

Decision support for strategic decision making on water supply of the Lower Volga River based on Pareto frontier visualization

M.V. Bolgov, A.L. Buber, A.V. Lotov

Abstract. The paper describes application of visualization of the Pareto frontier in the process of decision making in the framework of the methodology for integrated assessment of environmental problems. Integrated assessment is applied in supporting the choice of long-term strategic decisions on water management of the River Volga while a special attention is given to the problems of environmental sustainability and economic development of the Volga-Akhtuba floodplain. The methodology is outlined, the decision problem is formulated and the integrated mathematical model is described, which provides an opportunity to estimate the reliability of meeting of mutually contradicting requirements to water management. It is shown that application of the Pareto frontier visualization is an effective tool for supporting the decision making on feasible strategic goal for the Volga-Kama reservoir cascade control.

Keywords: decision support, multi-objective optimization, Pareto frontier visualization, integrated assessment of environmental problems, Volga-Akhtuba floodplain

References

1. Clarke L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P.R. Shukla, M. Tavoni, B.C.C. van der Zwaan, and D.P. van Vuuren. 2014. Assessing Transformation Pathways // Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
2. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi systemsnogo analiza. 1981. [Mathematical problems of systems analysis] Moscow: Nauka Pubs.
3. Moiseev N., Aleksandrov V., Krapivin V., Lotov A., Svirezhev J., and Tarko A. 1983. Global Models. The Biospheric Approach. Collaborative paper CP-83-33. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
4. Lotov A.V. 1994. O celostnom rassmotrenii ekologo-ekonomicheskikh problem [On integrated assessment of environmental problems]. Moscow: Computing Centre of Russian Academy of Sciences.
5. Lotov A.V. 1998. Computer-Based Support for Planning and Negotiation on Environmental Rehabilitation of Water Re-

- source Systems. In: D.P. Loucks (ed.) *Rehabilitation of Degraded Rivers: Challenges, Issues and Experiences*. Boston: Kluwer Academic Publishers. 417-446.
6. Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K., Chernykh O.L. 1997. Komp'uter i poisk kompromissa. Metod dostizhimykh celej. [Computer and the search for compromise. Feasible goals method]. Moscow: Nauka Publishers.
 7. Lotov A.V. 2002. Komputernaja vizualizacija obolochki Edgwortha-Pareto i eje primenenie v intellectualnykh sistemakh podderzhki prinjatija reshenij [Computer visualization of the Edgeworth-Pareto hull and its application in intellectual decision support systems]. *Informacionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy* [Information technologies and computer systems]. 1:83-100.
 8. Lotov A.V., Bourmistrova L.V., Efremov R.V., Bushenkov V.A., Buber A.L., and Brainin N.A. 2005. Experience of Model Integration and Pareto Frontier Visualization in the Search for Preferable Water Quality Strategies. *Environmental Modelling and Software*. 20(2):243-260.
 9. Dietrich J., Schumann A.H., Lotov A.V. 2007. Workflow oriented participatory decision support for integrated river basin planning. In: A. Castelletti and R. Soncini Sessa (eds.) *Topics on System Analysis and Integrated Water Resource Management*. Amsterdam: Elsevier. 207-221.
 10. Lotov A.V., Ryabikov A.I., Buber A.L. 2013. Visualizacija granicy Pareto pri razrabotke pravil upravlenija GES [Pareto frontier visualization in control rule elaboration for a hydropower plant]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij* [Artificial intelligence and decision making]. 1:70-83.
 11. Lotov A.V., Ryabikov A.I. 2014. Mnogokriterial'nyj sintez optimal'nogo upravlenija I ego primenenie pri postroenii pravil upravlenija kaskadom gidroelektrostantsij [Multiobjective constructing of feed-back optimal control and its application for the development of control rules for a cascade of hydropower plants]. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki Uro RAN* [Proceedings of Institute for mathematics and mechanics of the Ural branch of Russian Academy of Sciences]. 20(4): 187-203.
 12. Lotov A.V., Bushenkov V.A., and Kamenev G.K. 1999. Metod dostizhimykh celej. Matematicheskie osnovy i ekologicheskie prilozhenija [Feasible goals method. Mathematical basis and environmental applications]. New York, USA: Mellen Press.
 13. Branke J., Deb K., Miettinen K., Slowinski R. (eds.) 2008. *Multiobjective Optimization. Interactive and Evolutionary Approaches*. Lecture Notes in Computer Science, V. 5252. Berlin-Heidelberg: Springer.
 14. Lotov A.V., Bushenkov V.A., and Kamenev G.K. 2004. *Interactive Decision Maps. Approximation and Visualization of the Pareto Frontier*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
 15. Sawaragi Y., Nakayama H., Tanino T. 1985. *Theory of multiobjective optimization*. Orlando: Academic Press.
 16. Lotov A., Bushenkov V., Kamenev G., Camara A., Loucks D. 1998. *Water Resource Conflict Resolution Based on Interactive Tradeoffs Display*. In: D.P. Loucks (ed.) *Rehabilitation of Degraded Rivers: Challenges, Issues and Experiences*. Kluwer Academic Publishers: Boston. 447-470.
 17. Berezkin V.E., Kamenev G.K., Lotov A.V. 2006. Hybrid Adaptive Methods for Approximating a Nonconvex Multidimensional Pareto Frontier. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 46(11): 1918-1931.
 18. Berezkin V.E., Lotov A.V., Lotova E.A. 2014. Study of Hybrid Methods for Approximating the Edgeworth-Pareto Hull in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 54(6): 919-930.
 19. Lotov A.V. 2015. Decomposition of the Problem of Approximating the Edgeworth-Pareto Hull. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 55(10), p. 1653-1664.
 20. Metodicheskie ukazanija po razrabotke pravil ispol'zovanija vodokhranilizhch [Methodological regulations concerning development of rules for reservoir use]. *Utverzheny prikazom Minprirody Rossii ot 26 janvarja 2011 goda, № 17* [Approved by the order of Ministry of Nature of Russia on 26 January 2011, no.17]. Available at: img.rg.ru/pril/76/46/95/20655.doc
 21. Bolgov M.V., Buber A.L., Lotov A.V. 2015. Upravlenije vodnymi resursami Nizhnej Volgi na osnove informacionnoj tekhnologii analiza problem obespechennosti vodopol'zovatelej VKK GES [Water resources control in the Lower Volga River on the basis of information technology for analysis of water user supply reliability in the Volga-Kama cascade of hydropower plants]. *Trudy chetvortoj Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov»* [Proceedings of the fourth All-Russian conference 'Fundamental problems of water and water resources']. Moscow: Institute for water problems. P. 481-484.
 22. Bolgov M.V., Buber A.L., Lotov A.V., Komarovskij A.A. 2017. Poisk kompromissnykh reshenij pri planirovanii i upravlenii popuskami v nizhnij byef Volgogradskogo gidrouzla [Search for compromise decisions in management of releases to the lower bief of the Volgograd water-engineering system]. *Vodnye resursy* [Water Resources] (in print).

Bolgov M.V. Laboratory head, acting as deputy director of Institute for Water Problems of Russian Academy of Sciences. Dr. Hub., technical sciences. Graduated from Odessa hydrometeorological institute in 1979. Number of papers: more than 150 including 5 monographs. Fields of research: hydrology, water resource control. E-mail: bolgovmv@mail.ru

Buber A.L. Department head of Kostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation. Graduated from Lomonosov Moscow State University in 1972. Number of papers: more than 30. Fields of research: water resource control, hydro melioration. E-mail: buber49@rambler.ru

Lotov A.V. Head researcher of Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences. Dr. Hub., physical and mathematical sciences. Graduated from Moscow institute (university) for physics and technique in 1969. Number of papers: more than 160 including 4 monographs. Fields of research: multiobjective decision making, control theory. Email avlotov@gmail.com