

# Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами

Наталья М. Кузьмина<sup>1</sup>, Александра Н. Ридли<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации, Российская Федерация, Москва,

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, Москва

\*Alexandra.Ridley@yandex.ru



Наталья М.  
Кузьмина



Александра Н.  
Ридли

**Резюме. Цель.** В управлении инфраструктурными объектами возникает множество задач принятия решений, требующих оценивания альтернатив в условиях отсутствия четких критериев. Достаточно часто среди них встречаются задачи, в которых необходимо учесть разнообразное количество факторов. Данные факторы, как правило, относятся к различным областям знаний и требуют привлечения экспертов, обладающих компетенциями в данных областях. Так, например, к оценке инфраструктурных объектов могут быть привлечены экономисты, специалисты по земельному праву, экологи, специалисты по логистике, инженеры-проектировщики и другие узкопрофильные специалисты. Зачастую задачи усложняются тем, что существует большое множество альтернатив. В таких случаях достаточно сложно бывает организовать даже первичную экспертизу, целью которой будет являться уменьшение количества вариантов для дальнейшего рассмотрения. Основной целью работы является разработка модели оценивания критериев, влияющих на целесообразность модернизации инфраструктурного объекта, позволяющей учесть факторы из различных областей знаний, а также разработка методики, позволяющей упростить процесс оценки большого количества альтернативных вариантов. При этом данные оценки могут быть выражены в разных форматах: как количественно, так и качественно. Данные подходы получили применение в задаче ранжирования аэропортов с целью отбора аэропортов на статус аэропортов-кандидатов в Московский авиационный узел (МАУ). Особенностями данной задачи как раз является большой набор разнообразных факторов, которые требуется учесть, а также большое количество альтернативных вариантов – более 30 аэропортов, находящихся в радиусе 300 километров от Москвы. **Методы.** Применена модель синтеза рисков, опирающаяся на экспертные данные, характеризующие критерии, которые влияют на искомый риск, а также величины ущербов для каждого из объектов по данным критериям. Для оценки критериев использован метод, основанный на парных сравнениях, позволяющий экспертам задавать неточные и неполные оценки предпочтений сравниваемых альтернатив. Для оценки величины ущербов применен метод перевода качественных оценок в количественные, а также масштабирования количественных данных в количественную оценку ущербов. **Результаты.** В результате применения сформулированных в статье идей были определены величины вклада одиннадцати критериев, влияющих на достижение цели по разгрузке МАУ. По данным критериям были оценены частные риски для аэропортов в радиусе 300 километров от Москвы, и получены интегральные риски от модернизации каждого из аэропортов. Затем был составлен рейтинг аэропортов по величине риска от модернизации. **Заключение.** Предложенный метод обладает универсальностью и может быть применен для решения задач принятия решения в условиях неопределенности в тех областях, где требуется привлечение экспертов разного уровня подготовки и знания предмета оценки и требуется учет множества факторов в совокупности с большим разнообразием альтернатив.

**Ключевые слова:** синтез рисков, метод неполных парных сравнений, оценка ущербов, количественная оценка рисков.

**Для цитирования:** Кузьмина Н.М., Ридли А.Н. Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами // Надежность. 2020. №4. С. 42-49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-42-49>

Поступила 24.06.2020 г. / После доработки 18.08.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

## Введение

В управлении инфраструктурными объектами достаточно часто встречаются сложные многоаспектные задачи, решение которых требует привлечения экспертов из различных областей для оценки большого количества факторов: начиная с экономических и заканчивая земельным правом или экологией. Особенно актуальными остаются на протяжении уже ряда лет задачи принятия оптимальных решений по управлению системами в условиях низкого информационного уровня их математического описания, который характеризуется, во-первых, неопределенностью в выборе целевой функции и задании ограничений, связанной с наличием большого числа разноименных и противоречивых показателей вариантов развития системы, и, во-вторых, нестандартностью ситуаций принятия решений – возможностью вычисления для каждого варианта лишь значений отдельных показателей, незнанием и труднореализуемостью ряда важных свойств целевой функции, свойств области поиска и т.д. Преодоление неопределенности в требованиях к качеству вариантов в нестандартных ситуациях базируется, как правило, на более полной и корректной формализации многоцелевой задачи принятия решений, допускающей построение регулярной алгоритмической базы (именно поэтому такие задачи, как правило, относят к разряду слабо формализованных). Для этого на семантическом уровне моделирования вводятся понятия иерархии целей, ресурса, трудности достижения цели, компенсации, функции эквивалентности ценности и др. На их основе осуществляется аксиоматическое построение интегральных показателей, описывающих свойства системы и среды ее функционирования.

Принятие решений при этом в общем виде определяется как процесс выбора наилучшей альтернативы из всех возможных вариантов, но на практике достижение оптимального результата может быть проблематичным, поскольку лица, принимающие решения (ЛПР) и эксперты часто испытывают затруднения при принятии решений. Одним из наиболее важных разделов теории принятия решений, использующихся для определения наилучшего решения из всех возможных доступных вариантов, является многокритериальное принятие решений (МКПР). Существует несколько методов, позволяющих улучшить МКПР, в том числе: метод анализа иерархий Т. Саати [1] (англ.: Analytic Hierarchy Process, АНР); метод ранжирования превосходства и неполноценности [2]; метод ранжирования Simos [3]; теория полезности с несколькими атрибутами (МАУТ) [4]; метод исключения неизвестного и выбор, соответствующий реальности (ELECTRE) [5-7]; метод организации ранжирования предпочтений и выбор по преимуществам (СВА) [8]. Эти методы, некоторые из которых рассмотрены авторами во вводной части работы, часто используются для облегчения решения проблем принятия решений в практической деятельности.

АНР Саати представляет собой наиболее популярный МКПР, который привлек значительное внимание и обрел заслуженную популярность за последние два десятилетия. АНР обеспечивает ЛПР мощным средством принятия стратегических и обоснованных решений, что позволяет ЛПР использовать несколько количественных критериев для оценки потенциальных альтернатив и последующего выбора оптимального варианта. Такое широкое использование, безусловно, связано с простотой его применения и структурой АНР, соответствующей интуитивному способу, которым ЛПР решают проблемы. Иерархическое моделирование проблемы, возможность принятия устных суждений и проверка согласованности являются основными достоинствами метода. Наряду с его традиционными приложениями развиваются и новые направления, например, заключающиеся в использовании АНР в сочетании с другими методами: методами математического программирования, такими, как линейное программирование, анализ свертки данных (DEA), нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети, SWOT-анализ и так далее. Один из существенных недостатков метода АНР – увеличение вычислительной сложности нахождения собственных значений с увеличением размерности матрицы МКПР, однако нет никаких сомнений в том, что АНР будет все чаще и чаще приниматься на вооружение.

В качестве примера его практического применения рассмотрим задачу разгрузки московского авиационного узла (МАУ), представляющего собой систему аэропортов Москвы и Московской области. В аэропортах МАУ ежегодно осуществляется порядка 800 тыс. взлетно-посадочных операций в год за счет авиаперевозок пассажиров, грузов и рейсов деловой авиации. Подавляющее большинство из них – пассажирские, по статистическим данным<sup>1</sup> обеспечивающие пассажиропоток более 100 млн пассажиров в год. По прогнозам к 2030 году пассажиропоток возрастет до 180 млн пассажиров в год [9], что потребует увеличения пропускной способности существующей системы. Модернизации аэропортов, входящих в МАУ, в настоящий момент, недостаточно из-за высокой нагрузки на наземные виды транспорта в Москве, что приводит к необходимости рассматривать варианты увеличения количества аэропортов.

Строительство нового аэропорта более затратно, чем модернизация существующего. Например, стоимость строительства пассажирского терминала по предварительным оценкам составляет около 30 млрд рублей, в то время, когда модернизация существующего составляет примерно 5-7 млрд руб. Так как аэропортов в окрестностях Москвы и Московской области много, в первую очередь необходимо оценить целесообразность вложений в каждый конкретный аэропорт. Инвестиции в модернизацию каждого из них несут ряд рисков, связанных с их эффективностью для разгрузки в МАУ.

<sup>1</sup> Источник: [https://bit.ly/MOW\\_stat19](https://bit.ly/MOW_stat19) – статистика Росавиации (<https://favt.ru/>)

Сложность оценки альтернативных вариантов обусловлена большим количеством влияющих на принятие решения факторов и отсутствием соответствующей статистики. Вследствие этого неизбежно привлечение экспертов, имеющих квалификацию в разных областях. Такие эксперты могут высококвалифицированно оценить известную им область, но затрудняются в оценке смежных областей. Ввиду взаимозависимости и взаимовлияния факторов принятия решения, возникает задача обработки экспертных оценок, в которых отсутствуют или являются нечеткими оценки ряда факторов для сравниваемых альтернатив. Решение такой нетривиальной задачи можно получить с помощью так называемого метода синтеза рисков [10].

Рассмотрим задачу разгрузки МАУ в такой постановке.

## 1. Постановка задачи

Пусть  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – перечень из  $n$  критериев, по которым необходимо оценить и ранжировать перечень  $A_1, A_2, \dots, A_m$  из  $m$  аэропортов по величине риска их модернизации для целей разгрузки МАУ.

Риск в данном случае определяется величиной возможных ущербов от реализации выбранной в результате анализа альтернативы по сравнению с идеальной ситуацией, характеризуемой отсутствием (или приемлемым минимумом для ЛПР) подобных ущербов. В данной постановке риск понимается в смысле влияния неопределенности на достижение поставленных целей<sup>1</sup>. Неопределенность в рассматриваемой задаче обусловлена неопределенностью выбранных критериев и степени их влияния, а цель – разгрузка МАУ с минимальными издержками при реализации проекта. Бессмысленно говорить в данной постановке о частоте или вероятности реализации риска, поскольку цель анализа – выбор приемлемого с точки зрения ущерба (в случае неэффективности его эксплуатации) проекта модернизации МАУ.

Риск объекта (процесса) – это величина, пропорциональная отклонению от эталона качества объекта (процесса) [11, с. 15]. Качество объектов и риск можно измерять в сопоставимых шкалах. Мера риска – «угроза изменения состава или свойств объекта или окружающей его среды, либо появление изменений связанных с возникновением нежелательных процессов, обусловленных антропогенным или природным воздействием». При этом подчеркивается, что смысл этого определения – вероятностный.

На нижнем уровне иерархической структуры сравниваемые объекты описываются определенным набором показателей – частных показателей риска (ЧПР). Как показал анализ используемых в системных исследованиях интегральных оценок состояния сложных объектов и систем [12, 13, 14] широко используются обобщенные критерии (индексы) рисков: аддитивная (средневзвешенная арифметическая) и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая) формы.

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 31000-2019 Менеджмент риска. Принципы и руководство

Вследствие сказанного, риск в рассматриваемой задаче определим как функцию двух векторов  $U = (u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u_n)$  – вектора ущербов и  $W = (w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n)$  – вектора весовых коэффициентов ущербов (по сути, это и есть экспертная оценка возможности их появления) и может быть записан следующим образом [15]:

$$R(U, W) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i)^{w_i}, \quad (1)$$

где  $w_i > 0$  – ненулевые вероятности вкладов (веса), такие, что

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2)$$

В [15] показано, что в обоих случаях интегральный критерий может быть сконструирован с помощью многократного использования бинарной ассоциативной и коммутативной операции и является целой аналитической функцией от локальных критериев. Также в [15] показано, что класс таких операций достаточно узок и существует только три (с точностью до постоянных параметров) бинарные операции, удовлетворяющие условиям коммутативности, ассоциативности и целой аналитичности. Они задаются тремя следующими функциями<sup>2</sup>: а)  $c$ ; б)  $\Phi_1 + \Phi_2 + c$ ; в)  $a(\Phi_1 + \Phi_2) + b\Phi_1\Phi_2 + \frac{a(a-1)}{b}$ ;  $a, b, c - const, b \neq 0$ , причем именно третью из даваемых оценок (при определенных значениях входящих в нее коэффициентов) надо использовать для получения интегрального критерия качества при наличии взаимодействия между подсистемами и критериальными ограничениями на области изменения локальных оценок.

Интегральный риск принятия варианта модификации  $m$ -го аэропорта для включения в сеть узловых аэропортов, исходя из вышесказанного, соответственно:

$$R^m = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i^m)^{w_i}. \quad (3)$$

Для малых значений  $U^m$  интегральный риск принятия решения для варианта  $m$  совпадает с принятым определением риска:

$$R^m \approx 1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_i \times u_i^m) \approx \sum_{i=1}^n w_i \times u_i^m, \quad (4)$$

где  $u_i^m$  – величина ущерба для варианта  $m$  при использовании критерия  $i$ ,  $w_i$  – вероятности влияния критериев.

Введенный риск (1), который иногда называют геометрическим антириском [16], удовлетворяет основным априорным требованиям, лежащим в основе рискового подхода к построению нелинейной интегральной оценки  $R_{\odot}$ :

1) гладкость – непрерывная зависимость интегральной  $R$  оценки и ее производных от частных оценок:  $R(r_1, \dots, r_M)$ ;

2) ограниченность – границы интервала изменения частных  $r_i$  и интегральной  $R$  оценок:  $0 < R(r_1, \dots, r_M) < 1$  при  $0 < r_1, r_2, \dots, r_M < 1$ ;

3) равноценность – одинаковая важность частных оценок  $r_i$  и  $r_j$ ;

<sup>2</sup> См. там же

4) иерархическая одноуровненность – агрегируются лишь частные оценки  $r_{ij}$ , которые принадлежат одному уровню иерархической структуры;

5) нейтральность – интегральная оценка совпадает с частной оценкой, когда другая принимает минимальное значение:  $R(r_1, 0) = r_1$ ;  $R(0, r_2) = r_2$ ;  $R(0, 0) = 0$ ;  $R(1, 1) = 1$ .

6) однородность  $R(r_1 = r, \dots, r_M = r) = r$ .

Геометрический антириск является оценкой сверху для средневзвешенного арифметического и средневзвешенного геометрического. Подчеркнем также, что геометрический антириск удовлетворяет теореме «о хрупкости хорошего» в теории катастроф, согласно которой «...для системы, принадлежащей особой части границы устойчивости, при малом изменении параметров более вероятно попадание в область неустойчивости, чем в область устойчивости. Это проявление общего принципа, согласно которому все хорошее (например, устойчивость) более хрупко, чем плохое» [17, с. 31-32]. В анализе рисков используется аналогичный принцип лимитирующего фактора риска.

Таким образом, любая система может считаться «хорошей», если она удовлетворяет определенному набору требований, но должна быть признана «плохой», если не выполняется хотя бы одно из них. При этом все «хорошее», например экологическая безопасность территорий, более хрупко – утратить ее легко, а восстановить трудно.

В работе [18] для содержательной интерпретации такой оценки предлагается использовать вербально-числовую шкалу Харрингтона, имеющую достаточно универсальный характер.

Для решения обсуждаемой задачи необходимо последовательно решить следующие подзадачи:

1. Выбрать критерии, влияющие на величину риска.
2. Определить вклад критериев в величину риска.
3. Сформировать перечень рассматриваемых альтернатив.
4. Определить величины частных рисков каждой альтернативы по каждому критерию.
5. Оценить интегральный риск в соответствии с выбранной моделью для каждой альтернативы и ранжировать их.

## 2. Экспертные данные и результаты их обработки

### 2.1. Критерии и оценка их вклада в интегральный риск

Для определения перечня критериев, влияющих на риск от модернизации аэропорта, был произведен опрос экспертов по методике, в общем виде изложенной в [10] и включающей два этапа:

Этап 1. Эксперты по некоторой числовой шкале из личного опыта и предпочтений оценивают величину ущерба, к которому может привести определенное значение параметра. При этом, если параметры дискретные, то эксперт оценивает каждый из них. Для непрерывных значений выбираются диапазоны принимаемых значений, для которых эксперты производят оценивание. Чем

выше значение оценки ущерба, тем, по мнению эксперта, более возможен негативный исход.

Этап 2. Осуществляется определение весов, которое можно выполнить как при помощи прямого вычисления (собираем мнения экспертов об оценках других экспертов, выставляем коэффициенты оценок и вычисляем веса), так и при вычислении весов через коэффициенты. В последнем случае веса определяются в соответствии с процедурой метода анализа иерархий через нормированный вектор при максимальном собственном значении матрицы попарных сравнений [1]. Для каждой пары сравниваемых объектов определяется коэффициент на основе всех полученных экспертных оценок. При большом разбросе мнений относительно данного коэффициента разумно отказаться от какой-либо оценки, то есть оставить ячейку неопределенной.

В результате был сформирован следующий список критериев:

1. Оптимальное удаление от центра Москвы (КОУ).
2. Пропускная способность аэропорта (КПСА).
3. Качество и количество ВПП (КВПП).
4. Аэродромная инфраструктура (КАДИ).
5. Аэропортовая инфраструктура (КАПИ).
6. Инфраструктура других видов транспорта (КИДТ).
7. Земельные ресурсы (КЗР).
8. Наличие грузового терминала (КГР).
9. Наличие международного статуса (КМС).
10. Наличие совместного базирования (КСБ).
11. Форма собственности (КФС).

Как было замечено выше, поскольку данные критерии затрагивают различные сферы деятельности, для их сравнения требуется привлечение экспертов с различным профессиональным опытом, которые могут испытывать затруднения при сравнении критериев, не относящихся к области их профессиональных интересов. В связи с этим

Табл. 1. Вероятности влияния критериев

№	Критерий	Сокращение	Влияние критерия
1	Оптимальное удаление от центра Москвы	КОУ	0,1624
2	Пропускная способность аэропорта	КПСА	0,0673
3	Качество и количество ВПП	КВПП	0,1301
4	Аэродромная инфраструктура	КАДИ	0,1390
5	Аэропортовая инфраструктура	КАПИ	0,1330
6	Земельные ресурсы	КЗР	0,1282
7	Инфраструктура других видов транспорта	КИДТ	0,1570
8	Наличие грузового терминала	КГР	0,0233
9	Наличие международного статуса	КМС	0,0201
10	Наличие совместного базирования	КСБ	0,0219
11	Форма собственности	КФС	0,0178

Табл. 2. Список рассматриваемых в задаче вариантов

№	Список аэропортов
1	Клин-5 – г. Клин, Московская обл. (МО)
2	Семязино – г. Владимир
3	Добрыньское – г. Владимир
4	Мячково – Раменский р-н, МО
5	Туношна – г. Ярославль
6	Клоково – г. Тула
7	Мигалово – г. Тверь
8	Раменское – г. Жуковский, МО
9	Иваново-южн. – г. Иваново
10	Ефремов-Восточн. – Тульская обл.
11	Чкаловский – г. Щелково, МО
12	Грабцево – г. Калуга
13	Быково – г. Москва
14	Остафьево – г. Москва
15	Протасово – г. Рязань
16	Дягилево – г. Рязань

был использован метод неполных парных сравнений [19] с оценками предпочтений по шкале Саати [1], заданными интервально. Данный метод, благодаря своей гибкости, позволяет экспертам давать точные оценки в областях, где они уверены в наибольшей мере, и при этом указывать широкий разброс оценки предпочтений в отношении тех пар альтернатив, на счет которых эксперту сложно дать однозначный ответ в силу обозначенных выше причин. Данный подход позволяет, кроме того, повысить согласованность матрицы парных сравнений за счет удаления тех оценок предпочтений, которые нарушают согласованность по причине недостаточности шкалы оценивания [20].

Полученные данным методом веса критериев приведены в табл. 1.

## 2.2. Оценка величины ущерба по критериям

Итак, отобрано 11 критериев для оценивания альтернатив. С учетом того, что в группу наиболее значимых критериев вошел критерий оптимального удаления от Москвы (см. табл. 1), а также в связи тем, что аэропорты за пределами 300-километровой зоны от Москвы не будут привлекательны для пассажиров [21], в рассмотрение были включены только аэропорты в этой зоне. Помимо аэропортов «Внуково», «Домодедово» и «Шереметьево» в радиусе 300 км от Москвы располагается 31 аэропорт (табл. 2). Таким образом, если пытаться оценить каждый аэропорт по каждому критерию напрямую (то есть просить эксперта указать величину риска), в связи с размерностью задачи возможно большое количество ошибок. Кроме того, было замечено, что многие из критериев могут быть

№	Список аэропортов
17	Турлатово – г. Рязань
18	Крутышки – г. Ступино, МО
19	Змеево – г. Тверь
20	Третьяково – г. Луховицы, МО
21	«Можайский» – г. Можайск, МО
22	Алферьево – г. Волоколамск, МО
23	Волосово – г. Чехов, МО
24	Монино – МО, г. Монино, МО
25	Черное – МО, г. Балашиха, МО
26	Вихрево – Сергиево-Посадский р-н, МО
27	Ватулино – г. Руза, МО
28	Северка – г. Коломна, МО
29	Коробчеево – г. Коломна, МО
30	Борки – г. Кимры Тверская обл.
31	Ермолино – г. Балабаново Калужская обл.

охарактеризованы дополнительными однозначно объективными параметрами, содержащимися в технической документации: расстояние, длина, количество. В связи с этим, реализован упрощенный процесс экспертизы, согласно которому экспертам предлагалось оценивать не величину риска для каждого конкретного аэропорта, а характеристики, которыми они обладают. Там, где эти характеристики не были определены в официальных источниках (например, насколько хороша инфраструктура), проводилась экспертиза для каждого конкретного аэропорта.

Для каждого критерия совместно с экспертами были составлены шкалы оценивания аэропортов. Например, для оценки взлетно-посадочных полос (ВПП) была предложена двухмерная шкала по количеству полос и по длине наибольшей из них. При этом было определено, что по количеству есть различие для аэропортов с 1 ВПП, с 2 ВПП, а если у аэропорта 3 и более ВПП, то они относятся к одной категории. По длине, например, были выделены интервалы

Табл. 3. Оценка шкалы оценивания аэропортов по критерию КГР

Параметр	Отличное состояние ГТ	Хорошее состояние ГТ	Ограниченная деятельность ГТ	Грузовая деятельность отсутствует
Оценки, $C_i$	1	2	4	8
Макс ущерб, $\gamma$	0,4			
Риски, $R_i$	0,125	0,25	0,5	1
Ущерб, $U_i$	0,05	0,1	0,2	0,4

Табл. 4. Величины ущерба по шкале оценивания аэропортов по критерию КГР

Пропускная способность, тыс. пасс./год, на 2019 год	10000 и более	2000	1000	200	100	40	10 и менее
Ущерб, $U_i$	0,01	0,02	0,04	0,1	0,2	0,4	1

Табл. 5. Обработка экспертных оценок рассматриваемых вариантов модернизации МАУ

№	Оценки экспертов											№	Рассчитанные компоненты полезностей										
	КОУ	КПСА	КВВП	КАДИ	КАПИ	КЗР	КИДТ	КТР	КМС	КСБ	КФС		КОУ	КПСА	КВВП	КАДИ	КАПИ	КЗР	КИДТ	КТР	КМС	КСБ	КФС
1	0,04	0,99	0,16	0,8	0,8	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	1	0,99272	0,77543	0,97412	0,81421	0,83564	0,96997	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
2	0,08	0,8	0,28	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0	0,05	2	0,98520	0,91495	0,95180	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	1,00000	0,99917
3	0,05	0,35	0,13	0,4	0,8	0,01	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	3	0,99087	0,97649	0,97927	0,93684	0,83564	0,99863	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
4	0,01	0,99	0,62	0,8	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	4	0,99820	0,77543	0,86458	0,81421	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
5	0,38	0,3	0,07	0,1	0,1	0,2	0,4	0,05	0	0	0,02	5	0,91805	0,98049	0,98915	0,98663	0,98831	0,96997	0,92109	0,99873	1,00000	1,00000	0,99967
6	0,1	0,99	0,3	0,8	0,8	0,99	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	6	0,98133	0,77543	0,94777	0,81421	0,83564	0,53299	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
7	0,95	0,99	0,13	0,8	0,4	0,5	0,2	0,4	0	0	0,03	7	0,58517	0,77543	0,97927	0,81421	0,94460	0,90964	0,96473	0,98746	1,00000	1,00000	0,99950
8	0,01	0,01	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0	0	0,02	8	0,99820	0,99945	1,00000	0,98663	0,98831	0,96997	0,98319	0,99873	1,00000	1,00000	0,99967
9	0,37	0,38	0,13	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0	0	0,03	9	0,92068	0,97394	0,97927	0,98663	0,98831	0,96997	0,92109	0,99450	1,00000	1,00000	0,99950
10	0,38	0,8	0,13	0,4	0,8	0,5	0,8	0,01	0	0	0,02	10	0,91805	0,91495	0,97927	0,93684	0,83564	0,90964	0,77185	0,99975	1,00000	1,00000	0,99967
11	0,01	0,8	0,02	0,8	0,4	0,2	0,1	0,01	0	0	0,05	11	0,99820	0,91495	0,99697	0,81421	0,94460	0,96997	0,98319	0,99975	1,00000	1,00000	0,99917
12	0,055	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0	0	0,02	12	0,98993	0,97218	0,96700	0,93684	0,94460	0,90964	0,92109	0,98746	1,00000	1,00000	0,99967
13	0,01	0,5	0,23	0,2	0,8	0,99	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	13	0,99820	0,96244	0,96146	0,97190	0,83564	0,53299	0,98319	0,99740	0,99544	0,99819	0,99917
14	0,01	0,8	0,23	0,2	0,4	0,8	0,1	0,4	0	0	0,01	14	0,99820	0,91495	0,96146	0,97190	0,94460	0,80259	0,98319	0,98746	1,00000	1,00000	0,99984
15	0,09	0,4	0,23	0,2	0,4	0,99	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	15	0,98327	0,97218	0,96146	0,97190	0,94460	0,53299	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
16	0,09	0,8	0,07	0,2	0,8	0,8	0,2	0,4	0	0	0,03	16	0,98327	0,91495	0,98915	0,97190	0,83564	0,80259	0,96473	0,98746	1,00000	1,00000	0,99950
17	0,09	0,99	0,76	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	17	0,98327	0,77543	0,80684	0,81421	0,83564	0,80259	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
18	0,05	0,8	0,2	0,4	0,8	0,2	0,2	0,01	0	0	0,05	18	0,99087	0,91495	0,96700	0,93684	0,83564	0,96997	0,96473	0,99975	1,00000	1,00000	0,99917
19	0,08	0,99	0,93	0,4	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	19	0,98520	0,77543	0,67037	0,93684	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
20	0,065	0,99	0,07	0,2	0,8	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	20	0,98805	0,77543	0,98915	0,97190	0,83564	0,90964	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
21	0,05	0,99	0,54	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	21	0,99087	0,77543	0,88978	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
22	0,75	0,99	0,92	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	22	0,78038	0,77543	0,68397	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
23	0,03	0,99	0,98	0,4	0,4	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	23	0,99457	0,77543	0,55525	0,93684	0,94460	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
24	0,01	0,99	0,7	0,8	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	24	0,99820	0,77543	0,83438	0,81421	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
25	0,01	0,99	0,92	0,4	0,4	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	25	0,99820	0,77543	0,68397	0,93684	0,94460	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
26	0,03	0,99	0,62	0,4	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	26	0,99457	0,77543	0,86458	0,93684	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
27	0,04	0,99	0,95	0,4	0,4	0,99	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	27	0,99272	0,77543	0,63729	0,93684	0,94460	0,53299	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
28	0,05	0,99	0,99	0,4	0,4	0,8	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	28	0,99087	0,77543	0,50029	0,93684	0,94460	0,80259	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
29	0,05	0,99	0,76	0,8	0,4	0,99	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	29	0,99087	0,77543	0,80684	0,81421	0,94460	0,53299	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
30	0,06	0,99	0,62	0,8	0,4	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	30	0,98899	0,77543	0,86458	0,81421	0,94460	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
31	0,05	0,02	0,07	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0	0	0,03	31	0,99087	0,99888	0,98915	0,98663	0,98203	0,96997	0,96473	0,99450	1,00000	1,00000	0,99950

таким образом, что в рамках одной группы разница между ВПП незначительна (на каждом таком интервале не сильно различается разнообразие воздушных судов, способных безопасно осуществлять взлет/посадку).

По данным шкалам была произведена оценка параметров  $C_i$  – коэффициентов риска для  $i$ -го значения шкалы, выражающихся любым неотрицательным числом, и  $\gamma$  – максимального значения ущерба (по шкале от 0 до 1) по выбранному критерию. На основании данных параметров вычисляется значение риска  $R_i$  по данной величине параметра в шкале, а также величина ущерба  $U_i$  по следующим формулам:

$$R_i = \frac{C_i}{\max_i C_i}, \quad (5)$$

$$U_i = \gamma \times R_i. \quad (6)$$

Из формул и характеристик значений видно, что  $0 \leq U_i \leq R_i \leq 1$ . Так, например, рассмотрим оценки по критерию КГР (см. табл. 1), представленные в табл. 3. Данные оценки качественно характеризуют состояние грузового терминала (ГТ) аэропорта.

Так как понятия, используемые в данной шкале, относятся к оценочным (кроме последнего, точную информацию о котором можно найти), аэропорты оценивались экспертами и принималась во внимание самая популярная оценка. Однако, например, есть критерий КПСА (см. табл. 1), характеризующий пропускную способность аэропорта (количество пассажиров в год). Для данного критерия величины ущерба были оценены по шкале, представленной в табл. 4.

Очевидно, что данные параметры аэропортов в подавляющем большинстве находятся в интервале между значениями шкалы. Для таких аэропортов была использована кусочно-линейная аппроксимация. Для значения  $c$  из диапазона значений критерия  $[a, b]$  и соответствующего ему диапазона рисков  $[U_a, U_b]$  формула для вычисления риска имеет вид:

$$U_c = U_a + (c - a) \frac{U_b - U_a}{b - a}. \quad (7)$$

Результаты оценок, данных экспертами для каждого рассматриваемого варианта, и рассчитанные компоненты полезностей для всех выбранных ранее критериев приведены в табл. 5.

### 3. Ранжирование аэропортов по значению интегрального риска

Вычисление интегрального риска выполнено по формуле (1) с использованием данных, полученных согласно сформулированным выше принципам (см. табл. 5). В результате сформирован список из альтернативных аэропортов, первые десять из которых приведены в табл. 6. Следующие за ними в рейтинге аэропорты имеют значение риска выше 0,5 и не рассматриваются вследствие неприемлемости такого значения риска их модернизации.

Как видно из табл. 6, минимальный риск у проектов под номерами 1, 2, 3 и 4. Эти варианты следует рассматривать как предпочтительные при окончательном принятии решения об инвестировании в модернизацию МАУ.

### Заключение

Очевидно, что представленный алгоритм решения задачи синтеза рисков для ранжирования инфраструктурных объектов нельзя рекомендовать как единственный и безальтернативный при принятии решения об инвестировании средств в тот или иной проект. Однако подобные алгоритмы позволяют существенным образом сократить количество сравниваемых вариантов и дают ЛПР возможность детального рассмотрения оставшихся вариантов для выделения среди них наилучшего.

Описанный подход к синтезу рисков может быть востребован в различных областях как для крупных компаний, например, в оценке привлекательности инвестиционных проектов, строительстве инфраструктурных объектов, так и для малого бизнеса, например, в оценке риска аренды складских помещений или нового клиентского офиса. Последние задачи интересны тем, что на рынке недвижимости очень много объектов, описания которых содержатся на различных сайтах-агрегаторах. Ручная аналитическая обработка данных по таким объектам невозможна, поскольку часто приводит к ограниченному выбору вариантов наиболее близких (по мнению экспертов) к предпочтениям ЛПР, и оставляет за границами рассмотрения большое количество ни в чем не уступающих выбранным альтернатив. Предложенный алгоритм синтеза рисков упрощает задачу ЛПР и позволя-

Табл. 6. Рейтинг аэропортов по величине интегрального риска от их модернизации

№	Аэропорт	Населенный пункт	Регион	Интегральный риск
1	Раменское	г. Жуковский	Московская область	0,0747
2	Ермолино	г. Балабаново	Калужская область	0,1173
3	Туношна	г. Ярославль	Ярославская область	0,2293
4	Южный	г. Иваново	Ивановская область	0,2380
5	Грабцево	г. Калуга	Калужская область	0,3105
6	Чкаловский	г. Щелково	Московская область	0,3627
7	Добрыньское	г. Владимир	Владимирская область	0,3777
8	Остафьево	г. Москва	Москва	0,3799
9	Крутышки	г. Ступино	Московская область	0,3907
10	Дягицево	г. Рязань	Рязанская область	0,4684

ет легко автоматизировать процесс многокритериального выбора из большого количества альтернатив.

## Благодарности

Выражаем благодарность Сивене Дмитрию Сергеевичу, заместителю начальника Управления экономики и программ развития Федерального агентства воздушного транспорта, и Пашетных Александре Викторовне, советнику отдела формирования и отчетности ФЦП Управления экономики и программ развития Федерального агентства воздушного транспорта, за содействие в организации сбора и систематизации данных, использованных в исследовании.

## Библиографический список

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
2. Tam C.M., Tong Thomas K.L., Wong Y.W. Selection of concrete pump using the superiority and inferiority ranking method // Journal of construction engineering and management. 2004. Volume 130, Issue 6. P. 827-834.
3. Mohamed Marzouk, Omar Amer, Moheeb El-Said. Feasibility study of industrial projects using Simos' procedure // Journal of Civil Engineering and Management. 2013. Vol. 19:1. P. 59-68. DOI: 10.3846/13923730.2012.734855
4. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 400 с.
5. Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
6. Roy B., Bouyssou D. Aide Multicritere a la Decision: Methodes et Cas. Paris: Economica, 1993.
7. Vincke P. Multicriteria Decision Aid. Chichester: Wiley, 1992.
8. Greco S., Matarazzo B., Slowinski R. Rough sets methodology for sorting problems in presence of multiple attributes and criteria. // European Journal of Operational Research. 2002. Vol. 138. № 2. P. 247-259.
9. Аракелян К.М. Модель развития московского авиационного узла // Наука и транспорт. Гражданская авиация. 2013. № 3(7). С. 46-49. URL: [http://www.rostransport.com/science\\_transport/pdf/7/46-49.pdf](http://www.rostransport.com/science_transport/pdf/7/46-49.pdf).
10. Ридли А.Н. Методика синтеза рисков в управлении системами // «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. М.: МАИ, 2019. 1345 с. URL: [https://gagarin.mai.ru/files/2019/Abstracts\\_2019.pdf](https://gagarin.mai.ru/files/2019/Abstracts_2019.pdf). С. 713-714.
11. Карлин Л.Н., Музалевский А.А. Рискологические исследования в РГТМУ // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 5-19.
12. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4. С. 146-165.
13. Потапов А.И., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н. и др. Мониторинг, контроль, управление качеством окружающей среды: науч. и учеб.-метод. справ. пособие: В 3 ч. Ч. 3. Оценка и управление качеством окружающей среды. СПб.: РГТМУ, 2005. 598 с.
14. Шитиков В.Г., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М.: Наука, 2005. 281 с.

15. Артоболевский И.И., Руссман И.Б., Сергеев В.И. и др. О некоторых способах выбора интегрального критерия качества в задачах оптимального проектирования машин // Изв. АН СССР. Машиноведение. 1978. № 2. С. 3-10.

16. Каплинский А.И., Руссман И.Б., Умывакин В.М. Алгоритмизация и моделирование слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 168 с.

17. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.

18. Зибров Г.В., Умывакин В.М., Матвиец Д.А. Геоэкологическая квалиметрия природно-хозяйственных территориальных систем // Экологические системы и приборы. 2011. № 5. С. 3-9.

19. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Ридли А.Н. Метод восстановления вектора приоритетов альтернатив в условиях неопределенности или неполноты экспертных оценок. Надежность. 2017. Т. 17. № 3 (62). С. 41-48.

20. Xu Z.S. Goal programming models for obtaining the priority vector of incomplete fuzzy preference relation // International Journal of Approximate Reasoning. 2004. Vol. 36:3. P. 261-270.

21. Бородулина С., Соколов В., Окунева А. Логистика прогнозирования пассажиропотока на воздушном транспорте с учетом влияния региональных факторов // Логистика. 2015. № 4(101). С. 34-39. URL: [http://www.logistika-prim.ru/sites/default/files/s02\\_log\\_0415.pdf](http://www.logistika-prim.ru/sites/default/files/s02_log_0415.pdf).

## Сведения об авторах

**Кузьмина Наталья Михайловна** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Организация перевозок на воздушном транспорте», Московский государственный технический университет гражданской авиации, Российская Федерация, Москва, e-mail: [n.kuzmina@mstuca.aero](mailto:n.kuzmina@mstuca.aero)

**Ридли Александра Николаевна** — аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, Москва, e-mail: [Alexandra.Ridley@yandex.ru](mailto:Alexandra.Ridley@yandex.ru)

## Вклад авторов в статью

Автором **Кузьминой Н.М.** осуществлена поддержка организации сбора экспертных данных, подбор и верификация статистических данных и характеристик аэропортов, предоставлены сведения и подобраны источники по тематике гражданской авиации.

Автором **Ридли А.Н.** была применена описанная модель синтеза рисков для решения поставленной задачи, представлены идеи работы с полученными данными, сформулированы результаты исследования и возможные применения использованных в нем идей, моделей и методов для решения схожих задач.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.