

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРАФА ДИХОТОМИЧЕСКОЙ СВЕРТКИ КОМПОНЕНТОВ РИСКА СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЗАДАННОЙ ЕГО ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

А. С. Рей*, А. А. Широкий**, З. К. Авдеева***

*-***Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

*✉ a.rey@ipu.ru, **✉ shiroky@ipu.ru, ***✉ avdeeva@ipu.ru

Аннотация. Большинство известных методов и алгоритмов оценки рисков сложных организационных систем построены исходя из предположения, что оцениваемые компоненты совокупного риска являются независимыми. В то же время, на практике чаще встречаются примеры, когда риски друг с другом связаны, т. е. изменение одного из них влечет за собой изменение других. Поэтому при оценке совокупного риска организационных систем следует учитывать их сложность в смысле наличия большого количества связанных между собой рисков. Сделать это можно при помощи одного из методов многокритериального оценивания, а именно – механизма комплексного оценивания. В классическом варианте его компоненты – бинарные деревья критериев и матрицы логической свертки их значений – задаются экспертами. Однако во многих случаях эксперты не могут прийти к единому мнению о структуре дерева комплексного оценивания. В таких ситуациях на практике оказываются востребованы формальные методы синтеза структуры соответствующего дерева, учитывающие специфику рассматриваемой системы. При этом даже в случае, если метод не обеспечивает единственность решения, он гарантирует логическую обоснованность последнего, что и позволяет использовать результаты его применения при решении практических задач. В предлагаемой работе метод комплексного оценивания расширяется путем замены бинарного дерева комплексного оценивания дихотомической сверткой компонентов совокупного риска сложных организационных систем, построенной на основе заданной экспертами его декомпозиции. Предложен алгоритм идентификации графа дихотомической свертки компонентов риска, включая правила и критерии верификации построения. Полученные теоретические результаты применены для построения системы оценки риска возникновения авиационного происшествия.

Ключевые слова: оценка риска, совокупный риск, комплексное оценивание, бинарное дерево, дихотомическая свертка, иерархическая декомпозиция риска, риск возникновения авиационного происшествия.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие широко применяемые методы и подходы к управлению рисками в организационных системах в качестве основных задач, решаемых лицом, принимающим решение (ЛПР), включают в себя идентификацию рисков, их анализ и оценку, поиск управляющего воздействия и решение задачи оптимизации [1]. При этом встречаются как формальные постановки задач оценки рисков с

хорошо разработанным математическим аппаратом (обычно в работах, относящихся к математической теории управления, – см., например, [2–4]), так и слабо формализованные, характерные для работ в области менеджмента [5–7].

Основную массу работ, посвященных методам и алгоритмам оценки рисков сложных систем, в том числе и организационных, можно отнести к одному из двух следующих подходов. Следуя первому из них, авторы оценивают риски изолированно

но с целью дальнейшего их ранжирования или сравнения с пороговыми показателями, часто без учета их взаимосвязи, а совокупный (или интегральный) риск не рассчитывают [8–11]. Второй подход заключается в вычислении интегральной оценки риска системы путем суммирования локальных рисков [12–16] или, в случае применения сценарного подхода, суммируя показатели риска для каждого отдельного сценария [17]. При этом взаимное влияние рисков, как и в первом случае, чаще всего не рассматривается и не обсуждается.

С точки зрения декомпозиции интегрального риска в работах по оценке рисков организационных систем часто можно встретить классификационные [18] и причинно-следственные схемы [19], где совокупный риск или разбит на виды локальных рисков [20] или представлен в виде различных факторов [21] и других компонентов, характеризующих его. Такие схемы, составленные экспертами, можно рассматривать как иерархическую декомпозицию риска, т. е. структуру, описывающую интегральный риск системы.

Также в отдельных работах (см., например, [22, 23]) можно встретить представление структуры взаимосвязей локальных рисков в виде взвешенного ориентированного графа. Эксперименты по запуску импульсного процесса в таких структурах демонстрируют, как изменение величины отдельных локальных рисков влечет за собой изменение связанных локальных рисков и, как следствие, изменение значения интегрального риска рассматриваемой системы.

Таким образом, желание рассматривать риски комплексно, учитывая их взаимное влияние, является вполне естественным, несмотря на существенное усложнение модели риска. В настоящей статье рассматривается вопрос о получении оценки интегрального риска не как простой суммы значений идентифицированных локальных рисков, а в виде комплексной оценки, построенной на основе экспертных знаний о взаимном влиянии компонентов совокупного риска друг на друга.

Целью настоящей работы является расширение широко применяемого на практике для оценки рисков сложных организационных систем метода комплексного оценивания (МКО) путем создания формального алгоритма преобразования заданной экспертами иерархической декомпозиции совокупного риска в дихотомическую свертку его компонентов, т. е. в ориентированный граф, в каждую вершину которого либо входят две дуги, либо не входит ни одной. Такая свертка позволяет, с одной стороны, использовать характерные для МКО операции в виде дихотомической свертки оценок ком-

понентов риска для построения комплексной оценки, а с другой – напрямую учесть взаимное влияние компонентов риска, поскольку число исходящих из конкретной вершины дуг не ограничено (в классическом варианте чаще всего используется дерево, т. е. не может быть более одной исходящей дуги).

Структура изложения материала в настоящей работе следующая. Обзору работ, описывающих как сам МКО, так и известные алгоритмы идентификации дерева комплексного оценивания, посвящен § 1. В § 2 поставлена и решена задача идентификации дихотомической свертки компонентов риска, также подробно обсуждается алгоритм построения дихотомической свертки по заданной иерархической декомпозиции на синтетическом примере. В § 3 содержится описание исходных данных для экспертного построения иерархической декомпозиции риска возникновения авиационного происшествия; здесь детально рассмотрен процесс идентификации дихотомической свертки по ранее заданной иерархической декомпозиции риска возникновения авиационного происшествия и предъявлен соответствующий расширенный механизм комплексного оценивания этого риска.

1. ОБЗОР РАБОТ ПО АЛГОРИТМАМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕРЕВЬЕВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Механизм комплексного оценивания является одним из методов многокритериального оценивания объектов [24] и используется в качестве механизма контроля при управлении в организационных и производственных системах для оценки и ранжирования сложных объектов [25]. К компонентам МКО относятся сами критерии оценки, надстроенные над ними бинарные деревья и матрицы логической свертки, заданные экспертным путем [26, 27]. Первоначально МКО был разработан в качестве механизма контроля в электронной промышленности [28].

В дальнейшем выяснилось, что его потенциал значительно шире, и в настоящее время он используется, например, для управления эколого-экономическими системами при оценке экологических рисков [29], для оценки потенциала или выбора наиболее эффективных проектов [30], для программ регионального развития с целью оценки и реализации поставленных целей и задач [31], для оценки эффективности управления недвижимостью [32]. Таким образом, обсуждаемый механизм демонстрирует определенную универсальность применения, в связи с чем авторы считают воз-



можным использовать его и в настоящей работе, посвященной оценке рисков в авиационной отрасли.

Критерии оценки в МКО сворачиваются попарно для получения агрегированных оценок. Эти оценки, в свою очередь, также сворачиваются попарно – до тех пор, пока не сформируется корень дерева, называемый комплексной оценкой (в случае оценивания рисков некоторой сложной системы значение в корне дерева может быть интерпретировано как величина интегрального риска). При этом порядок свертки критериев в общем случае не детерминирован и, в классическом варианте, определяется экспертным методом на основании неких общих представлений о важности критериев или предпочтений экспертов. При этом вполне естественным является желание формализовать или даже автоматизировать этот процесс тем или иным способом.

Одним из способов идентификации структуры дерева комплексного оценивания (КО) является использование обучающих наборов, основанных на преобразовании таблицы истинности [33, 34]. Авторы работ [26, 35–37] представляют МКО в виде унитарного вектора для нейросетевой идентификации и синтеза механизмов КО. На основе предварительно сгенерированных различными методами структур [38, 39] строится прогноз, какое из возможных деревьев КО следует использовать. В упомянутой серии работ был предложен алгоритм по получению групп эквивалентности (таблица ветвей, список структур). Анализ этих групп позволяет исключить заведомо нереализуемые структуры (т. е. группы эквивалентности, превышающие заданные шкалы), а также исключить зеркальные структуры.

В случае отсутствия полного обучающего набора авторы работы [40] предлагают использовать метод декомпозиции, раскладывая наборы листьев дерева до тех пор, пока все допустимые наборы не будут разложены на подгруппы. Это позволяет исключать целые семейства ветвей. Несмотря на достаточно глубокую проработанность этого подхода, авторы отмечают, что проблема выбора структуры бинарных деревьев пока сохраняется [26].

Другим известным способом является метод бинарной композиции, суть которого состоит в следующем. Вначале эксперты выделяют и ранжируют критерии оценки по степени важности. Затем ЛПР на основе некоторой заданной функции предпочтений объединяет соседние критерии в дихотомическую структуру. Преимуществом этого метода является сохранение монотонности функции предпочтений ЛПР на всех уровнях дерева КО

[41]. Однако этот способ не гарантирует, что дерево вообще удастся построить – в частности, если критерии оценки не являются рядоположенными, эксперт просто не сможет их обоснованно ранжировать. Например, при оценке качества региональной системы здравоохранения используются такие критерии, как медианный уровень квалификации профильных специалистов и средняя длительность госпитализации. Попытка сравнить их важность напрямую, без учета особенностей конкретной рассматриваемой системы здравоохранения, успешной не будет.

Еще одним способом построения дерева КО является метод последовательной дихотомии. Он предполагает деление формулировки итоговой оценки объекта или системы на две более конкретные взаимодополняющие друг друга формулировки. При этом не должна нарушаться полнота, а также обязана сохраняться непротиворечивость и соблюдаться причинно-следственная связь. Этот процесс продолжается для дочерних формулировок до тех пор, пока не появляются объективные измеримые критерии [42]. Отметим, что способов разделения общей формулировки на две более конкретные может быть больше одного. Кроме того, значения некоторых из полученных на нижнем уровне дерева объективных измеримых критериев может оказаться невозможно (точнее, нецелесообразно трудоемко) получить. Например, одним из объективных критериев востребованности образовательной программы высшего образования является средняя заработная плата выпускников после выпуска. Однако у вуза нет механизмов получения этих значений, поэтому на практике такой критерий не применяется.

Правила построения МКО позволяют использовать его для решения задач по оценке рисков с учетом взаимного влияния его компонентов. Во многих работах интегральная оценка риска осуществляется по дихотомической структуре [17, 29, 43, 44]. При классическом подходе использования МКО для оценки риска характеристики риска разбиваются экспертами на две категории: те, что можно точно посчитать, и те, значение которых точно рассчитать невозможно [45].

При этом в случае, если изначально заданная структура характеристик риска не имеет вида дерева, у экспертов могут возникнуть трудности в отношении того, как из декомпозиции построить логичную дихотомическую структуру. Для решения данной проблемы авторы работы расширяют механизм комплексного оценивания, предлагая алгоритм идентификации графа дихотомической свертки компонентов риска на основе заданной экспертами иерархической декомпозиции риска.

Стоит отметить, что дихотомическую свертку всегда можно представить в виде дерева путем разделения вершин, оказывающих влияние более чем на одну вершину предшествующего яруса. При этом могут возникать некоторые сложности при решении, к примеру, задачи поиска минимального бюджета для снижения риска до заданного уровня – метод дихотомического программирования всегда находит оптимальное решение над деревом, но в случае дихотомической структуры возможно лишь получить его нижнюю оценку. Решения подобных задач на деревьях и дихотомических структурах, а также методы перехода от нижней оценки к точному решению, обсуждались, например, в работах [46, 47].

Авторы рассматривают заданные экспертами иерархические структуры риска. Природа их может быть различной, например причинно-следственной или классификационной. К структуре компонентов риска авторы предъявляют следующие требования:

- на верхнем ярусе иерархии должна быть ровно одна – корневая – вершина (рассматриваемый риск), номера ярусов остальных вершин приемлемы равными длине пути от нее до корневой вершины;
- подграфы, образованные подмножествами вершин соседних (с номерами, отличающимися на единицу) ярусов и соединяющих их ребер, являются двудольными.

Стоит отметить, что разработка алгоритма идентификации структуры дерева комплексного оценивания уже проводилась авторами в рамках исследования по оценке рисков системы Интернета вещей [48]. Работа же предлагаемого в настоящей статье модифицированного алгоритма продемонстрирована на примере одной из наиболее опасных угроз при деятельности авиакомпании – угрозы возникновения авиационного происшествия.

Предложенный авторами подход можно связать с концепцией критических сочетаний событий, где для каждой аварийной комбинации строится граф, отражающий структуру возникновения такой комбинации. На основании таких структур строятся дифференциальные уравнения, позволяющие определить вероятность возникновения аварий и катастроф [49].

В отличие от вероятностного анализа безопасности [см., например, работы 50–52], при котором также учитывается взаимосвязь рисков, предложенный авторами способ позволяет в перспективе рассчитать уровень риска в условиях ограниченной статистики, адаптируясь под реальное время. Несмотря на то, что вероятностный анализ без-

опасности является общепризнанным инструментом количественной оценки риска с опорой на статистику отказов, комплексная оценка с использованием алгоритма идентификации графа дихотомической свертки учитывает слабоформализуемые и качественные показатели без необходимости ввода коэффициентов с высокой степенью неопределенности.

К функциям авиакомпаний относятся организация и осуществление перевозок пассажиров, багажа, грузов, техническое обслуживание воздушных судов, выполнение коммерческих работ, таких как продажа билетов, организация маршрутов. В работах исследователей можно встретить следующие укрупненные группы рисков для авиакомпаний: отраслевой риск, связанный со спецификой организации авиаперелетов, региональный риск, зависящий от политической и экономической обстановки; правовой риск, зависящий от изменения законодательства [53]. Тем не менее, предотвращение возникновения угроз безопасности авиаперевозок, является первостепенной задачей для любой авиакомпании. Очевидно, что серьезное нарушение безопасности влечет за собой появление сопутствующих важных рисков для авиакомпании – финансовых, производственных, коммерческих, репутационных.

Увеличение объемов авиаперевозок и количества пассажиров требует от авиакомпаний совершенствования подходов к обеспечению безопасности, в том числе совершенствования методов прогнозирования и оценки рисков, а также способов их снижения. В мае 2025 г. Международный авиационный комитет (МАК) опубликовал отчет [54], в котором указано, что в сравнении с 2023 г., количество авиационных происшествий выросло до 46 случаев с 26 в предыдущий год, а количество катастроф, которые привели к гибели людей, доходит до 65, в сравнении с 31 в 2023 г. А в глобальном масштабе, по данным Международной ассоциации воздушного транспорта [55], число погибших в результате авиационных катастроф выросло до 244 человек против 72 в 2023 г.

Так как авиационное происшествие – катастрофа или авария – это событие, которое может повлечь за собой гибель людей (получение телесного повреждения со смертельным исходом), повреждение или разрушение воздушного судна, а также его пропажу [56, 57], авторами будет рассмотрен риск наступления авиационного происшествия как наиболее критичного и опасного авиационного события. Классификация авиационных происшествий закреплена в нормативных документах (см., например, [58]). К категориям происшествий по-



вышенного риска относятся: столкновение исправного воздушного судна с землей, несанкционированный выезд за пределы взлетно-посадочной полосы (ВПП), потеря управления в полете, столкновение в воздухе. В рамках данной работы будет рассмотрено одно из событий повышенного риска [59].

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГРАФА ДИХОТОМИЧЕСКОЙ СВЕРТКИ НА ОСНОВЕ ЗАДАНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

2.1. Математическая постановка задачи идентификации графа свертки компонентов риска

Предположим, что для рассматриваемой системы задана иерархическая декомпозиция ее интегрального риска в форме ориентированного графа $G=(V, E)$ ярусно-параллельной формы. Вершина, соответствующая интегральному риску, – единственная в графе, имеющая нулевую степень захода. Для удобства обозначим ее $v_0 \in V$. Остальные вершины имеют степень захода 1 или больше.

Напомним, что содержательно такая декомпозиция отражает взаимное влияние компонентов риска друг на друга, их причинно-следственную связь. По этой причине непосредственной оценке в такой модели могут подвергаться только те компоненты, которым в графе G соответствуют вершины с нулевой степенью захода (в частном случае, когда G является деревом, такие вершины называются листьями). Оценки остальных компонентов на каждом ярусе иерархической декомпозиции могут быть получены как результат агрегирования оценок компонентов следующего яруса.

Процедура свертки вершин графа заключается в последовательном агрегировании оценок критериев нижнего яруса в обобщенную (агрегированную) оценку критерия вышестоящего яруса. В случае если граф представлен в виде дерева, данная процедура реализуется путем движения от листьев к корню, где каждой вершине приписано правило агрегирования – матрица свертки. Матрица определяет, каким образом сочетание оценок нижестоящих вершин преобразуется в оценку вышестоящей вершины.

Формально данное определение можно записать следующим образом. Пусть S_{v_0} – множество оценок критериев, K_{v_0} – их комплексная оценка, которая определяется в вершине v_0 . Если l_1^1 и l_1^2 –

вершины дерева, непосредственно предшествующие вершине v_0 , то $S_{v_0} = S_{l_1^1} \cup S_{l_1^2}$, а оценка K_{v_0} получается на основе матричной свертки обобщенных оценок $K_{l_1^1}$ и $K_{l_1^2}$ [60].

Процедура свертки значений критериев по методу комплексного оценивания предусматривает попарную свертку компонентов. В то же время, если некоторые компоненты риска декомпозируются на три или более подкомпонентов, то возникает вопрос о порядке сворачивания их оценок. Именно эту задачу – о выборе порядка агрегирования компонентов риска на промежуточных ярусах иерархической декомпозиции – авторы рассматривают в настоящей работе.

Формально задача заключается в поиске такого отображения

$$\mathfrak{F}: G(V, E) \rightarrow G'(V', E'), V \subseteq V',$$

что любая из вершин $v \in V'$ имеет степень захода либо 2, либо 0. Отметим, что не вводится требование о единичной степени захода для всех вершин, за исключением v_0 . Таким образом, формально $G'(V', E')$ не обязано быть бинарным деревом, что является наиболее распространенным условием реализации классического метода комплексного оценивания. Поэтому в данном случае уместно говорить о некоторой его обобщенной модификации.

2.2. Алгоритм идентификации графа дихотомической свертки компонентов риска

Пусть $n \in \mathbb{N}$ – число ярусов ориентированного графа иерархической декомпозиции интегрального риска защищаемой системы. Обозначим $L_i \subset V$, $1 < i \leq n$, подмножество вершин i -го яруса декомпозиции $G=(V, E)$.

Определение 1. Будем говорить, что подмножества вершин $V_i \subseteq L_i$ и $V_{i-1} \subseteq L_{i-1}$, $L_i, L_{i-1} \subset V$ графа $G=(V, E)$ являются сильно смежными, если $\forall u \in V_i \forall v \in V_{i-1} \exists (u, v) \in E$, т. е. если каждая вершина множества V_{i-1} имеет входящую дугу из каждой вершины множества V_i .

Определение 2. Будем говорить, что подмножества вершин $V_i \subseteq L_i$ и $V_{i-1} \subseteq L_{i-1}$, $L_i, L_{i-1} \subset V$ графа $G=(V, E)$ являются слабо смежными, если $\forall u \in V_i \exists v \in V_{i-1} \exists (u, v) \in E$, т. е. если каждая вер-

шина множества V_{i-1} имеет входящую дугу из хотя бы одной вершины множества V_i . ♦

Заметим, что сильно смежные подмножества всегда одновременно являются и слабо смежными. Обратное в общем случае неверно, поэтому число слабо смежных подмножеств не может быть меньше числа сильно смежных подмножеств.

Алгоритм представляет собой последовательность следующих действий.

Шаг 1. Зададим $i = n + 1$.

Шаг 2. Дополним иерархическую декомпозицию $G(V, E)$ «фиктивным» ярусом L_i таким, что $\forall v \in L_i \exists! u \in L_{i-1} : (u, v) \in E$.

Шаг 3. Для вершин i -го и $(i-1)$ -го яруса построим бинарные матрицы B_i и D_i размерностью не более чем $|2^{L_i}| \times |2^{L_{i-1}}|$, строки и столбцы которых комплементарны всем непустым допустимым (некоторые комбинации могут быть запрещены в силу невозможности соответствующих сочетаний) подмножествам вершин соответственно i -го и $(i-1)$ -го яруса. Элементы матриц, соответствующие смежным вершинам (подмножествам вершин), приравняем к единице, остальные – к нулю.

Шаг 4. Рассчитаем вектор-суммы $\vec{S}(B_i) = (b_i^1, \dots, b_i^{i-1})$, $\vec{S}(D_i) = (d_i^1, \dots, d_i^{i-1})$ где b_i^j , d_i^j – суммы j -х столбцов матриц B_i и D_i соответственно.

Шаг 5. Для каждой пары непустых смежных подмножеств вершин $V_{i-1}^k \subseteq L_{i-1}$ и $V_i^k \subseteq L_i$ рассчитаем величину

$$\bar{Y}_{i-1}^k = \frac{\vec{S}(B_i)}{\vec{S}(D_i)},$$

которую будем называть вектором значений *показателей зависимости* подмножеств. Отметим, что операция деления векторов $\vec{S}(B_i)$ и $\vec{S}(D_i)$ – поэлементная. Заметим, что в силу определений 1, 2 и построения величины $\bar{Y}_{i-1}^k$, значение показателя зависимости $y_{i-1}^k \in \bar{Y}_{i-1}^k$ при прочих равных условиях будет тем больше, чем меньше мощность множества V_{i-1}^k .

Шаг 6. Далее будем последовательно сворачивать пары вершин $(i-1)$ -го яруса и (на последующих подшагах) их подмножеств V_{i-1}^k ,

$V_{i-1}^m \subseteq L_{i-1}$, $k \neq m$, с максимальными среди всех ранее не свернутых вершин или их подмножеств значениями показателя зависимости, формируя таким образом дихотомическую иерархическую структуру оценки риска. На каждом подшаге в нее добавляются сворачиваемые вершины (подмножества вершин) в случае, если они не были включены в нее ранее, а также создается новая, обозначающая их объединение вершина, которую соединим двумя дугами с вершинами, сворачиваемыми на текущем подшаге. Несвернутыми вершинами (подмножествами вершин) считаются те, у которых в новой иерархии либо отсутствует соответствующая им вершина, либо ее степень захода равна нулю.

Шаг 7. Если $i > 1$, то задать $i = i - 1$ и перейти к шагу 3. В противном случае алгоритм завершен.

Результатом выполнения вышеприведенного алгоритма будет дихотомическая иерархия $G'(V', E')$, на нулевом ярусе которой находится вершина v_0 , отражающая комплексную оценку совокупности компонентов $(i-1)$ -го яруса иерархической декомпозиции интегрального риска рассматриваемой системы, а множество ее висячих вершин совпадает с таковым для исходной иерархической декомпозиции $G(V, E)$.

Отметим, что поскольку порядок агрегации вершин $(i-1)$ -го яруса определяется их связями с вершинами i -го яруса, то для сворачивания висячих вершин иерархической декомпозиции в алгоритме предусмотрено создание дополнительного яруса. В рассматриваемой чисто математической постановке задачи он носит фиктивный характер, но при решении конкретных задач он должен получить содержательный смысл – например, можно произвести декомпозицию риска более детальную, чем требуется для принятия решения, или отразить в дополнительном ярусе установленную взаимозависимость непосредственно измеряемых компонентов риска.

Для обеспечения выполнимости алгоритма необходимо также разрешить вопрос о том, как выбирать пару вершин (подмножеств вершин) L_{i-1} для свертки на текущем подшаге шага 6 в случае, если максимальное значение показателя зависимости достигается на трех или более несвернутых вершинах (их подмножествах), либо, что приводит к той же ситуации, максимум достигается на одном подмножестве, а второе после максимального значение – на двух или более кандидатах на сворачивание.

На текущем – формальном – этапе предложить конструктивный критерий, обеспечивающий единственность решения, невозможно. Тем не менее, при применении алгоритма на практике можно учесть специфику рассматриваемой сложной организационной системы и ввести дополнительные показатели приоритизации свертки (например, важность компонента риска или частоту встречаемости фактора). В п. 3.1, где рассматривается отраслевая организационная система (авиакомпания), это будет продемонстрировано.

2.3. Алгоритм идентификации графа дихотомической свертки на основе заданной иерархической декомпозиции (синтетический пример)

Для иллюстрации описанного в предыдущем разделе алгоритма идентификации графа дихотомической свертки компонентов риска рассмотрим синтетический пример. Пусть иерархическая декомпозиция интегрального риска сложной организационной системы представлена в виде ориентированного графа $G=(V, E)$ с числом ярусов $n=2$, причем $|V|=8$, $|L_1|=3$, $|L_2|=4$, $\{v_0\} \cup L_1 \cup L_2 = V$ (рис. 1).

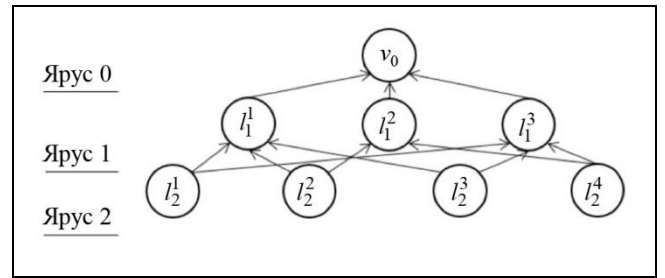


Рис. 1. Пример иерархической декомпозиции интегрального риска

Рассмотрим подробнее одну итерацию алгоритма, в которой будем сворачивать вершины яруса 1 иерархической декомпозиции на основе их взаимной зависимости через вершины следующего – яруса 2. Выполнение алгоритма начнется с шага 3 при $i=2$.

Шаг 3. Для вершин яруса 2 и яруса 1 построим бинарную матрицу B_2 , ячейки, соответствующие сильно смежным подмножествам вершин, приравняем к единице, остальные к нулю (табл. 1), а также матрицу D_2 , ячейки, соответствующие слабо смежным подмножествам вершин, приравняем к единице (табл. 2). Обе матрицы будут иметь размерность 7×15 . В таблицах для удобства восприятия матрицы приведены в транспонированном виде.

Таблица 1

Матрица сильно смежных подмножеств вершин ярусов 1 и 2 (транспонирована)

	l_1^1	l_1^2	l_1^3	l_1^1, l_1^2	l_1^1, l_1^3	l_1^2, l_1^3	l_1^1, l_1^2, l_1^3
l_2^1	1	0	1	0	1	0	0
l_2^2	1	1	0	1	0	0	0
l_2^3	1	0	1	0	1	0	0
l_2^4	0	1	1	0	0	1	0
l_2^1, l_2^2	1	0	0	0	0	0	0
l_2^1, l_2^3	1	0	1	0	1	0	0
l_2^1, l_2^4	0	0	1	0	0	0	0
l_2^1, l_2^2, l_2^4	1	0	0	0	0	0	0
l_2^2, l_2^4	0	1	0	0	0	0	0
l_2^3, l_2^4	0	0	1	0	0	0	0
l_2^1, l_2^2, l_2^3	1	0	0	0	0	0	0
l_2^1, l_2^2, l_2^4	0	0	0	0	0	0	0
l_2^1, l_2^3, l_2^4	0	0	1	0	0	0	0
l_2^2, l_2^3, l_2^4	0	0	0	0	0	0	0
$l_2^1, l_2^2, l_2^3, l_2^4$	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Матрица слабо смежных подмножеств вершин ярусов 1 и 2 (транспонирована)

	l_1^1	l_1^2	l_1^3	l_1^1, l_1^2	l_1^1, l_1^3	l_1^2, l_1^3	l_1^1, l_1^2, l_1^3
l_2^1	1	0	1	1	1	1	1
l_2^2	1	1	0	1	1	1	1
l_2^3	1	0	1	1	1	1	1
l_2^4	0	1	1	1	1	1	1
l_2^1, l_2^2	1	0	0	1	1	0	1
l_2^1, l_2^3	1	0	1	1	1	1	1
l_2^1, l_2^4	0	0	1	0	1	1	1
l_2^1, l_2^4	1	0	0	1	1	0	1
l_2^2, l_2^4	0	1	0	1	0	1	1
l_2^3, l_2^4	0	0	1	0	1	1	1
l_2^1, l_2^2, l_2^3	1	0	0	1	1	0	1
l_2^1, l_2^2, l_2^4	0	0	0	0	0	0	0
l_2^1, l_2^3, l_2^4	0	0	1	0	1	1	1
l_2^2, l_2^3, l_2^4	0	0	0	0	0	0	0
$l_2^1, l_2^2, l_2^3, l_2^4$	0	0	0	0	0	0	0

Шаг 4. Рассчитаем вектор-сумму $\vec{S}(B_2) = (b_2^1, \dots, b_2^{1,2,3}) = (7, 3, 7, 1, 3, 1, 0)$ и вектор-сумму $\vec{S}(D_2) = (d_2^1, \dots, d_2^{1,2,3}) = (7, 3, 7, 9, 11, 9, 12)$.

Шаг 5. Рассчитаем вектор $\vec{Y}_1$. Результаты вычислений приведены в табл. 3 с округлением до двух знаков после запятой.

Таблица 3

Значения показателей зависимости смежных подмножеств вершин ярусов 1 и 2

Показатель	l_1^1, l_1^2	l_1^1, l_1^3	l_1^2, l_1^3	l_1^1, l_1^2, l_1^3
$\vec{S}(B_2)$	1	3	1	0
$\vec{S}(D_2)$	9	11	9	12
$\vec{Y}_1$	0,11	0,27	0,11	0

Шаг 6. Как видно из табл. 3, максимальным значением показателя зависимости среди подмножеств вершин обладает показатель зависимости подмножеств l_1^1, l_1^3 , его значение равно 0,27. Следовательно, на первом подшаге требуется свернуть вершины l_1^1 и l_1^3 , а на втором – добавить ранее не свернутую вершину l_1^2 к результату их свертки. Таким образом, получится дихо-

томическая свертка (в данном случае являющаяся деревом), отражающая комплексную оценку компонентов яруса 1 иерархической декомпозиции общего риска (рис. 2).

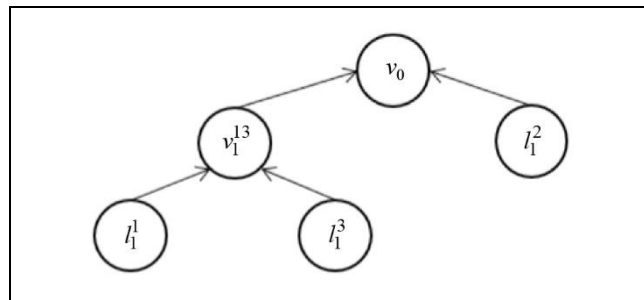


Рис. 2. Дихотомическая структура комплексной оценки

3. ПОСТРОЕНИЕ ДИХОТОМИЧЕСКОЙ СВЕРТКИ РИСКА АВИАЦИОННОГО ПРОИСШЕСТВИЯ НА ОСНОВЕ ЕГО ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

3.1. Иерархическая декомпозиция риска авиационного происшествия

В качестве иллюстрации работоспособности алгоритма идентификации графа дихотомической

свертки компонентов риска сложных организационных систем на основе заданной экспертами иерархической декомпозиции был выбран риск возникновения одного из самых опасных авиационных происшествий, а именно – столкновения исправного воздушного судна с землей (англ. *Controlled Flight Into Terrain, CFIT*). На возникновение данного авиационного происшествия влияет множество способствующих факторов и потенциальных событий. Это и неблагоприятные погодные условия, и дезориентация пилота, и ошибки в построении схем и документации, и ошибки автоматизации, и эксплуатационная нагрузка [58].

Структуризация факторов и их взаимосвязей, характеризующих ситуации авиационных происшествий, основана на извлечении факторов и связей типа причина – следствие на основе анализа документов, таких как международные стандарты и руководства ИКАО (Международная организация гражданской авиации) [58, 61–67], отраслевые стандарты и руководства ИАТА (Международная ассоциация воздушного транспорта) [68, 69], руководства и инструменты Фонда безопасности полетов [70], Воздушный кодекс РФ [71], Правила использования воздушного пространства РФ [72, 73], приказы Минтранса Российской Федерации [74, 75], официальные письма и документы Росавиации [76], базы по расследованиям авиационных инцидентов, происшествий, катастроф [77, 78].

Методика структуризации основана на применении причинно-следственных моделей представ-

ления знаний о ситуации, источником которых служит качественная и количественная информация [79]. Отношение причина – следствие, подтверждаемое экспертом ссылками, задает на множестве факторов, влияющих на авиационные события, отношения частичного порядка. При этом, используя алгоритмы преобразования получаемых причинно-следственных графов, можно построить иерархическую декомпозицию факторов как основу для модели комплексного оценивания событий, заданных состоянием факторов авиационного происшествия.

На примере авиационной безопасности экспертами была проведена структуризация факторов и их взаимосвязей, влияющих на авиационные происшествия, на основе чего была построена иерархическая декомпозиция риска авиационного происшествия в виде трехъярусного ($n = 3$) ориентированного графа (рис. 3).

На рис. 4 изображена иерархическая декомпозиция риска столкновения исправного воздушного судна с землей. Штриховыми стрелками отмечены вершины, соответствующие факторам, которые могут действовать только в комбинации с другими. Входящие в каждую конкретную вершину дуги окрашены одним цветом.

Перечень вершин каждого яруса графа с расшифровкой их содержательной интерпретации, а также со ссылками на документ, задающий причинно-следственную связь, представлены в табл. 4–6.

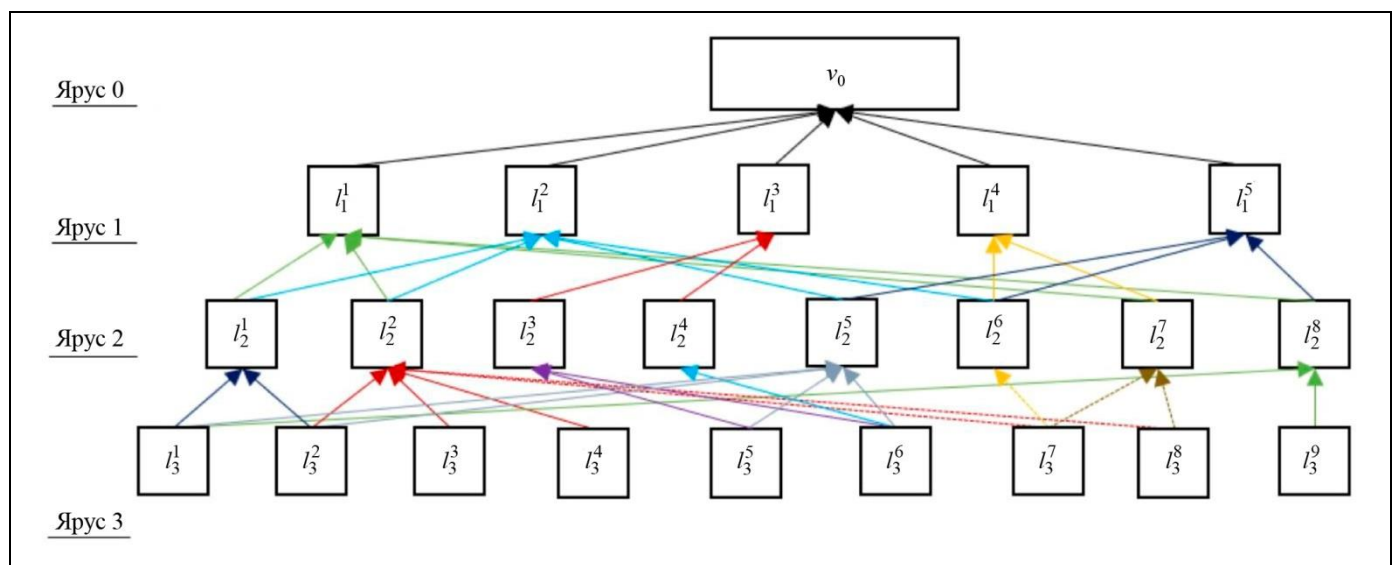


Рис. 3. Иерархическая декомпозиция риска столкновения исправного воздушного судна с землей

Таблица 4

Перечень вершин яруса 1

L_1	Расшифровка	Ссылка на источник
l_1^1	Неверные действия при управлении воздушным судном, усталость пилота, сенсорные иллюзии и потеря ситуационной осведомленности	[58, 63]
l_1^2	Ограничение обзора, потеря ориентиров, ошибка пилота при посадке или взлете, схема неточного захода на посадку и недостаточная документация	[58, 63]
l_1^3	Неверные инструкции пилоту, недопонимание ситуации, использование фразеологии (стандартной и нестандартной)	[58, 63]
l_1^4	Полет в неблагоприятных условиях окружающей среды, условия ограниченной метеорологической видимости при отсутствии видимости наземных ориентиров, несоответствие условий для взлета (посадки), потеря контроля над судном при посадке	[58, 63]
l_1^5	Проблемы с оборудованием воздушного судна: радиочастотные помехи для работы глобальной навигационной спутниковой системы, повреждение (искажение) систем предупреждения о близости с землей, радиовысотомеров. Потеря управления воздушным судном, невозможность корректировать траекторию	[58, 63]

Таблица 5

Перечень вершин яруса 2

L_2	Расшифровка	Причинно-следственная связь с вершинами яруса 1	Ссылка на источник
l_2^1	Неадекватные сбои в CRM-системе: скрытие ошибок. Невыявление потенциальных угроз, нереагирование (запоздалое реагирование) на предупреждение о близости с землей	l_1^1	[68, 69]
		l_1^2	[70, <i>ALAR Briefing Note 2.1 – Человеческий фактор</i>]
l_2^2	Ошибки пилота: неправильное управление, неадекватные действия летного экипажа – продолжение снижения ниже минимальной высоты, неверные расчеты, неверное взаимодействие с автоматикой, несоблюдение процедур, усталость, дезориентация, отсутствие осведомленности, стресс	l_1^1	[70, <i>ALAR Briefing Note 2.1 – Человеческий фактор</i>]
		l_1^2	[68, 69]
l_2^3	Отсутствие органа, обслуживающего воздушные движения или ошибка наземной службы: неправильная подготовка ВПП, некорректная информация о метеоусловиях	l_1^3	[58, 68, 69]
l_2^4	Ночь и сложные метеоусловия, аварийные ситуации на земле: обвалы, пожары, землетрясения	l_1^3	[68, 69]
l_2^5	Состояния ВПП (лед, слякоть, снег, вода), ледяные отложения: наледь на крыльях, стабилизаторах, лобовом стекле (прогнозируемый фактор)	l_1^2	[70, <i>Руководство по оценке степени риска</i>]
		l_1^5	[70, <i>Руководство по оценке степени риска</i>]
l_2^6	Нарушение метеорологического минимума при взлете, посадке, состоянии ВПП (лед, слякоть, снег, вода), ледяные отложения – наледь на крыльях, стабилизаторах, лобовом стекле (случайный погодный фактор)	l_1^2	[70, <i>Руководство по оценке степени риска при заходе на посадку</i>]
		l_1^4	[70, <i>Руководство по оценке степени риска при заходе на посадку</i>]
		l_1^5	[70, <i>Руководство по оценке степени риска при заходе на посадку</i>]



Окончание табл. 5

l_2^7	Сильный ветер: порывы ветра, турбулентность, сдвиг ветра, сильный боковой ветер, попутные ветры	l_1^1	[63; 70, ALAR Briefing Note 8.7 – Посадка при боковом ветре]
		l_1^4	[70, ALAR Briefing Note 8.7 – Посадка при боковом ветре]
l_2^8	Неисправность оборудования: сбой в работе систем управления полетом, навигации, связи, гидравлики, двигателей, в системах предупреждения о близости с землей, радиовысотомеров	l_1^1	[68; 69; 70, контрольный перечень CFIT]
		l_1^5	[68; 69; 70, контрольный перечень CFIT]

Таблица 6

Перечень вершин яруса 3

L_3	Расшифровка	Причинно-следственная связь с вершинами яруса 2	Комментарий	Ссылка на источник
l_3^1	Культура безопасности: отсутствие культуры безопасности, низкий уровень культуры компании, игнорирование рисков, нежелание сообщать о проблемах	l_2^1	–	[68; 69; 70, ALAR Briefing Note 2.1 – Человеческий фактор]
		l_2^5		
		l_2^8		
l_3^2	Недостаточная подготовка экипажа: недостаток опыта, неполное знание процедур, недостаточная тренировка	l_2^1	–	[58, 63, 68–70]
		l_2^2		
		l_2^5		
l_3^3	Усталость экипажа: длительные перелеты, смены часовых поясов, недостаток сна	l_2^2	–	[58]
l_3^4	Болезнь экипажа: вирусные или бактериальные инфекции	l_2^2	–	[58]
l_3^5	Неэффективная система управления: недостаточная координация действий между экипажем, диспетчерами, наземной службой	l_2^3	–	[58, 63, 68–70]
		l_2^5		
l_3^6	Недостаточная техническая поддержка: отсутствие своевременного технического обслуживания, ремонта (аэропорт)	l_2^3	–	[70]
		l_2^4		
		l_2^5		
l_3^7	Плохая видимость: туман, дождь, снег, гроза, дым	l_2^2	Работает только в совокупности с одной или несколькими вершинами яруса 3	[70, Руководство по оценке степени риска]
		l_2^6		
		l_2^7		
l_3^8	Неблагоприятная топография: горные хребты, холмы, леса, водоемы	l_2^2	Работает только в совокупности с одной или несколькими вершинами яруса 3	[63]
		l_2^7		
l_3^9	Недостаточная техническая поддержка: отсутствие своевременного технического обслуживания, ремонта, модернизации (флот)	l_2^8	–	[70]

3.2. Комплексная оценка риска

столкновения исправного воздушного судна с землей на основе иерархической декомпозиции риска

Прежде всего, требуется определить порядок агрегирования компонентов риска в вершинах яруса 2, т. е. какие вершины следует сворачивать для получения значений оценок вершин яруса 1. Для этого построим матрицы B_3 и D_3 . Их размерность составляет 255×511 . Рассчитаем векторы $\vec{S}(B_3)$, $\vec{S}(D_3)$ и вектор показателей зависимости $\vec{Y}_2$. Фрагмент показателей зависимости представлен в табл. 7. Для сокращения размерности таблицы не указаны показатели зависимости вершин яруса 2 со значением 0.

Для тех вершин яруса 1, что имеют только две входящие дуги (l_1^3, l_1^4), порядок свертки определен естественным образом. Для остальных – это вершины l_1^1, l_1^2, l_1^5 – воспользуемся алгоритмом, описанным в п. 2.2. Некоторые из получившихся дихотомических иерархических подструктур приведены на рис. 4.

Повторим действия алгоритма для построения дерева комплексной оценки риска столкновения исправного воздушного судна с землей. Строим матрицы B_2 и D_2 , размерности обеих – 31×255 . Рассчитываем значения векторов $\vec{S}(B_2)$, $\vec{S}(D_2)$. Затем вычислим вектор $\vec{Y}_1$. В табл. 8 приведены

показатели зависимости вершин ярусов 1 и 2 и порядок их свертки.

Таблица 7

Рассчитанные значения показателя зависимости подмножеств вершин яруса 2

Подмножества вершин	Значение показателя зависимости, округление до 4-го знака после запятой
l_2^1, l_2^2	0,0303
l_2^1, l_2^5	0,2
l_2^1, l_2^8	0,2
l_2^2, l_2^5	0,0222
l_2^2, l_2^7	0,0322
l_2^3, l_2^4	0,3333
l_2^3, l_2^5	0,2
l_2^4, l_2^5	0,0666
l_2^5, l_2^8	0,0588
l_2^1, l_2^2, l_2^5	0,0222
l_2^1, l_2^5, l_2^8	0,0588
l_2^3, l_2^4, l_2^5	0,0666

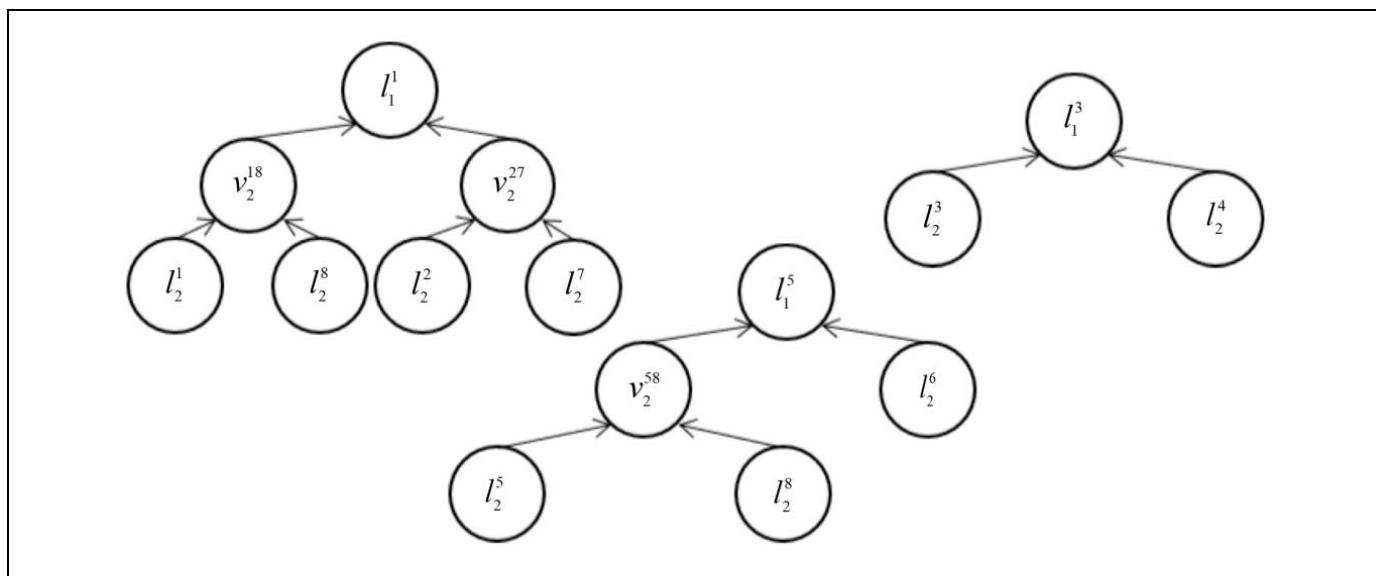


Рис. 4. Некоторые структуры комплексной оценки для вершин яруса 1

Таблица 8

**Рассчитанные значения показателя зависимости
подмножеств вершин яруса 1**

Подмно- жества вершин	Значение показателя зави- симости, округление до 4-го знака после запятой	Порядок свертки
l_1^1, l_1^2	0,1794	—
l_1^1, l_1^3	0	3
l_1^1, l_1^4	0,0588	—
l_1^1, l_1^5	0,0476	—
l_1^2, l_1^4	0,0303	—
l_1^2, l_1^5	0,2258	1
l_1^4, l_1^5	0,1111	—
l_1^1, l_1^2, l_1^5	0,0256	—
l_1^2, l_1^4, l_1^5	0,0303	2

На основании значений компонент вектора Y_1 можем построить дерево комплексной оценки интегрального риска выбранного авиационного происшествия. Корневой вершиной является интегральный риск, а листья – вершины яруса 1, значения оценок которых найдены на основании предыдущих шагов. Полученная дихотомическая структура представлена на рис. 5. Как видно из табл. 8,

пара вершин l_1^2, l_1^5 сворачивается в первую очередь, так как значение показателя у этой пары вершин является максимальным. Следом добавляем вершину l_1^4 к объединенной вершине v_1^{25} , так как значение показателя зависимости комбинации этих вершин является максимальным среди всех ранее несвернутых вершин. В последнюю очередь сворачиваем оставшиеся несвернутые вершины l_1^1 и l_1^3 , получая вершину-агрегат v_1^{13} .

Пример дихотомической свертки комплексной оценки риска столкновения исправного воздушно-го судна с землей приведен для иллюстрации предлагаемого подхода. Тем не менее, дихотомические свертки широко используются в задачах управления рисками [80, 81], а вариант с авиационными происшествиями, рассматриваемый в настоящей статье, может быть использован специалистами службы безопасности полетов для оценки текущего уровня риска. На основе оценки уровня рисков ЛПР сможет принимать решение о выборе управляющего воздействия, в том числе в рамках ГОСТ и отраслевых стандартов.

В настоящей работе не предлагается оптимальная структура. Авторы допускают, что в случае отсутствия единственности решения, когда показатели зависимости равнозначны или равны нулю, попарно сворачивать следует критерии на основании схожести природы возникновения (экипаж, наземные службы, погодные условия или технологический фактор).

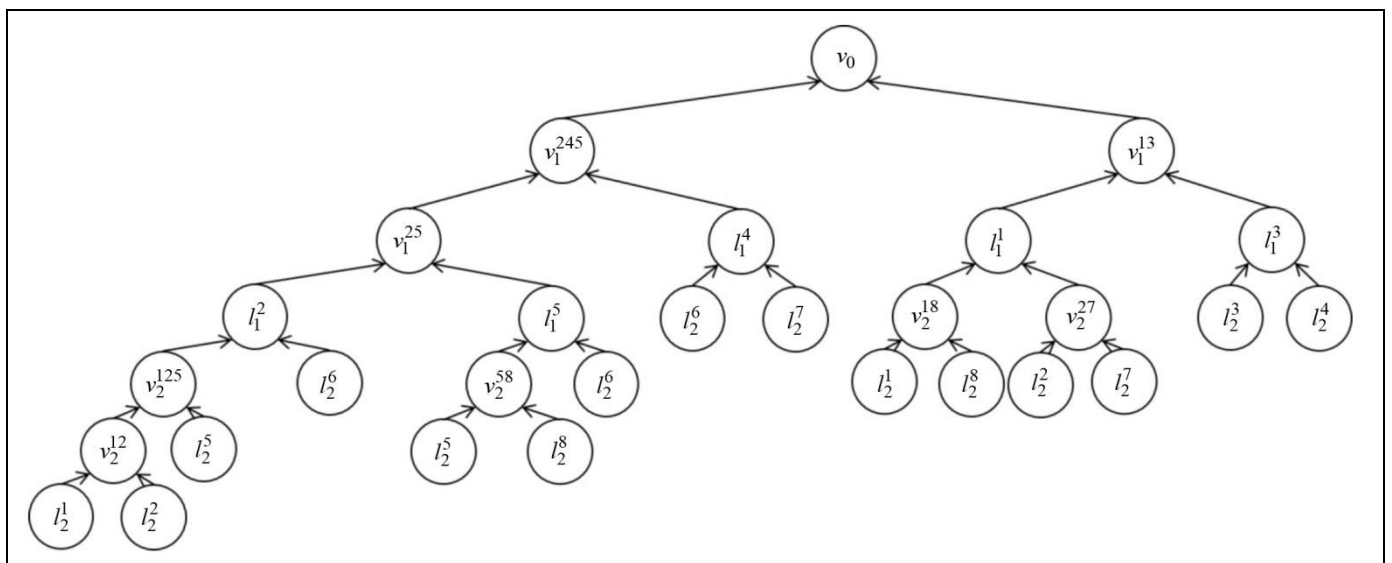


Рис. 5. Дихотомическая свертка комплексной оценки риска столкновения исправного воздушного судна с землей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен алгоритм идентификации графа дихотомической свертки компонентов риска с целью определения порядка их агрегирования. Суть его заключается в преобразовании заданной экспертами иерархической декомпозиции риска, отражающей причинно-следственные связи его компонентов, в дихотомическую иерархию путем добавления новых вершин-агрегатов. Порядок агрегирования при этом выбирается исходя из показателя близости сворачиваемых компонентов, значение которого определяется общностью связей с «причинными» вершинами, т.е. находящихся на следующем уровне декомпозиции. Число уровней при этом в общем случае не ограничено.

Предложенный алгоритм является расширением классического метода комплексного оценивания. Необходимость расширения обусловлена тем, что сам по себе метод не предусматривает автоматической генерации структур – эта работа возлагается на экспертов – а известные публикации по методам генерации деревьев комплексного оценивания не учитывают предметную область системы. Работоспособность алгоритма продемонстрирована на примере сложной организационной системы – авиакомпании, а в качестве декомпозируемого риска был выбран риск столкновения исправного воздушного судна с землей.

Отметим, что рассматриваемый в настоящей работе вариант алгоритма полагает компоненты риска равнозначными. В дальнейших работах авторы планируют рассмотреть более общий вариант алгоритма, позволяющий выбирать порядок агрегирования компонентов риска в случае, когда значение показателя близости, рассчитанное в предположении равнозначности причинных компонентов, не позволяет его однозначно идентифицировать (например, требуется свернуть три вершины с попарно равными значениями этого показателя). Вопросы идентификации оптимальной структуры и ее валидации, а также разработки устойчивых признаков для сравнительного анализа и отбора одной из нескольких структур требуют отдельного рассмотрения и будут освещены в последующих работах авторов.

Также следует отметить еще одно ограничение: не для каждой системы существует причинно-следственный граф. Использование предложенного алгоритма может быть затруднительно в плохо формализуемых областях управления рисками, например социальных, политических, экономиче-

ских и иных системах, где причинно-следственные связи не закреплены в нормативных источниках.

С точки зрения практики предложенный алгоритм автоматизирует решение задачи построения структуры иерархии комплексного оценивания, что, во-первых, снижает нагрузку на эксперта, а во-вторых, существенно снижает вариативность структур в случае, если экспертов несколько.

ЛИТЕРАТУРА

1. Landoll, D. The Security Risk Assessment Handbook: A Complete Guide for Performing Security Risk Assessments. 3rd Edition. – Boca-Raton: CRC Press, 2021. – 512 p.
2. Gunes, B., Kayisoglu, G., Bolat, P. Cyber Security Risk Assessment for Seaports: A case Study of a Container Port // Computers & Security. – 2021. – Vol. 103, no. 1. – Art. no. 102196.
3. Fan, Z., Xu, F. Health Risks of Occupational Exposure to Toxic Chemicals in Coal Mine Workplaces Based on Risk Assessment Mathematical Model Based on Deep Learning // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 22, no. 6. – Art. no. 101500.
4. Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., et al. Guidance on the Use of the Benchmark Dose Approach in Risk Assessment // EFSA Journal. – 2018. – Vol. 16, no. 7. – Art. no. 5327.
5. ISO/IEC 27005:2022(EN) Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection – Guidance on Managing Information Security Risks. – Geneva: International Organization for Standardization, 2022.
6. Barraza de la Paz, J.V., Rodríguez-Picón, L.A., Morales-Rocha, V., Torres-Argüelles, S.V. A Systematic Review of Risk Management Methodologies for Complex Organizations in Industry 4.0 and 5.0 // Systems. – 2023. – Vol. 11, no. 5. – Art. no. 218.
7. Wahyudi, D., Taryana, T., Tawil, M.R., et al. SWOT Analysis in Business Risk Awareness in MSMEs // TECHNOVATE: Journal of Information Technology and Strategic Innovation Management. – 2024. – Vol. 1, no. 2. – P. 56–61.
8. Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Дранко О.И. и др. Анализ безопасности функционирования и оценка рисков в сложных транспортных системах на основе модельно ориентированного подхода // Труды 15-й Междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2015). – Москва, 2022. – С. 905–911. [Rezchikov, A.F., Cvirkun, A.D., Dranko, O.I., et al. Analiz bezopasnosti funkcionirovaniya i ocenka riskov v slozhnyh transportnyh sistemah na osnove model'no orientirovannogo podhoda // Trudy 15-i Mezhdunaradnoi konferentsii "Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh system" (MLSD'2015). – Moscow, 2022. – P. 905–911. (In Russian)]
9. Сиротюк В.О. Анализ и оценка рисков информационной безопасности организаций // Материалы 28-й Междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – Москва, 2020. – С. 232–238. [Sirotyuk, V.O. Analiz i ocenka riskov informacionnoj bezopasnosti organizacij // Materialy 28-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniya bezopasnost'ju slozhnyh system". – Moscow, 2020. – P. 232–238. (In Russian)]



10. Горина М.С. Оценка рисков и угроз экономической безопасности предприятия // Естественно-гуманитарные исследования. – 2024. – № 3 (53). – С. 113–119. [Gorina, M.S. Assessment of Risks and Threats to the Economic Security of the Enterprise // Natural-Humanitarian Studies. – 2024. – No. 3 (53). – P. 113–119. (In Russian)]
11. Красных В.А. Анализ методов оценки рисков в строительном производстве // Молодежь в науке и творчестве: Материалы междунар. науч. форума. – Гомель, 2021. – С. 138–140. [Krasnyh, V.A. Analiz metodov ocenki riskov v stroitel'nom proizvodstve // Molodezh' v nauke i tvorchestve: Materialy mezhdunaradnogo nauchnogo foruma. – Gomel', 2021. – P. 138–140. (In Russian)]
12. Тетеринец Т.А. Интегральная оценка рисков устойчивого развития регионов // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию со дня рождения первого Президента Кабардино-Балкарской Республики Валерия Мухамедовича Кокова. – Нальчик, 2021. – С. 138–141. [Tsetsirtnets, T.A. Integrated Risk Assessment of Sustainable Development of Regions // Science, Education and Business: A New View or Strategy for Integration Interaction: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the birth of the first President of the Kabardino-Balkarian Republic Valery Mukhamedovich Kokov. – Nalchik, 2021. – P. 138–141. (In Russian)]
13. Глухов В.В., Войтюк В.Н. Модель комплексной оценки рисков проекта по созданию промышленных парков // π-Economy. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 114–127. [Glukhov, V.V. and Voytyuk, V.N. Comprehensive Risk Assessment Model for an Industrial Park Project // π-Economy. – 2023. – Vol. 16, no. 1. – P. 114–127. (In Russian)]
14. Xiao, L., Huang, G., Zhang, G. An Integrated Risk Assessment Method Using Z-fuzzy Clouds and Generalized TODIM // Quality and Reliability Engineering International. – 2022. – Vol. 38, no. 4. – P. 1909–1943.
15. Chang, J., Yin Z., Zhang, Z., et al. Multi-disaster Integrated Risk Assessment in City Range—A Case Study of Jinan, China // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2023. – Vol. 20, no. 4. – Art. no. 3483.
16. López-Saavedra, M., Martí, J. Reviewing the Multi-hazard Concept. Application to Volcanic Islands // Earth-Science Reviews. – 2023. – Vol. 236, no. 4. – Art. no. 104286.
17. Куликова Е.Ю. Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2-1. – С. 124–133. [Kulikova, E.Yu. Methods of Forming an Integral Risk Assessment in Mine and Underground Construction // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2021. – No. 2-1. – P. 124–133. (In Russian)]
18. Калашников А.О. Модели и методы организационного управления информационными рисками корпораций. – М.: ЭГВЕС, 2011. – 312 с. [Kalashnikov, A.O. Modeli i metody organizacionnogo upravlenija informacionnymi riskami korporacij. – Moscow: JeGVES, 2011. – 312 s. (In Russian)]
19. Юлгушев А.М. Иерархическая классификация предпринимательских рисков // Экономика и управление. – 2024. – Т. 30, № 3. – С. 394–402. [Yulgushev, A.M. Hierarchical Classification of Entrepreneurial Risks // Economics and Management. – 2024. – Vol. 30, no. 3. – P. 394–402. (In Russian)]
20. Брыкалов С.М., Трифонов В.Ю., Гурьева Е.А. Разработка классификатора рисков как этап успешного риск-менеджмента // Проблемы анализа риска. – 2022. – Т. 18, № 6. – С. 40–53. [Brykalov, S.M., Trifonov, V.Ju., Gureva, E.A. Development of a Risk Classifier as a Stage of Successful Risk Management // Issues of Risk Analysis. – 2022. – Vol. 18, no. 6. – P. 40–53. (In Russian)]
21. Чубурова Ж.Т., Чакеева Д.К. Факторы, влияющие на экономическую эффективность деятельности предприятия // М. Рыскулбеков атындагы Кыргыз экономикалык университетинин кабарлары. – 2021. – № 1. – С. 144–146. [Chakeyeva, D.K. Factors Affecting the Economic Efficiency of the Enterprise // Bulletin of Kyrgyz Economic University. – 2021. – No. 1. – P. 144–146. (In Russian)]
22. Chernov, I.V. Scenario-Cognitive Modeling of Complex Systems Based on Event-Driven Identification of Factor Dynamics // Control Sciences. – 2023. – No. 3. – P. 55–64.
23. Калашников А.О., Аникина Е.В. Модели управления информационными рисками сложных систем // Информация и безопасность. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 191–202. [Kalashnikov, A.O., Anikina, E.V. Information Risk Management Models of Complex Systems // Information and Security. – 2020. – Vol. 23, no. 4. – P. 191–202. (In Russian)]
24. Корнеев В.П. Метод решения задачи многокритериального оценивания и выбора эффективного инновационного проекта // Инновационная экономика и менеджмент: методы и технологии: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Москва, 2020. – С. 251–254. [Korneenko, V.P. Method for Solving the Multi-Criterial Evaluation Problem and Selecting an Effective Innovative Project // Innovacionnaja jekonomika i menedzhment: metody i tehnologii: Materialy 5-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Moscow, 2020. – P. 251–254. (In Russian)]
25. Баркалов С.А., Новосельцев В.И., Половинкин А.И., Шипилов В.Н. Модели управления конфликтами и рисками: монография / под ред. Д.А. Новикова. – Воронеж: Научная книга, 2008. – 495 с. [Barkalov, S.A., Novoseltsev, V.I., Polovinkin, A.I., Shipilov, V.N. Modeli upravlenija konfliktami i riskami: monografija / pod red. D.A. Novikov – Voronezh: Nauchnaja kniga, 2008. – 495 s. (In Russian)]
26. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Сергеев В.А. Идентификация механизмов комплексного оценивания на основе унитарного кода // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – Вып. 87. – С. 67–85. [Burkov, V.N., Korgin, N.A., Sergeev, V.A. One-Hot Approach to Identification of Integrated Rating Mechanisms // Large-Scale Systems Control. – 2020. – Iss. 87. – P. 67–85. (In Russian)]
27. Korgin, N.A., Rozhdestvenskaya, S. Concordant Approach for R&D Projects' Evaluation and Ranking for Formation of Programs // Proceedings of the 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – 2017. – P. 1–5.
28. Трапезников В.А., Гореликов Н.И., Бурков В.Н. и др. Комплексный подход к управлению научно-техническим прогрессом в отрасли // Вестник Академии наук СССР. – 1983. – № 3. – С. 33–43. [Trapeznikov, V.A., Gorelikov, N.I., Burkov, V.N., et al. Kompleksnyj podhod k upravleniju nauchno-tehnicheskim progressom v otrasli // Vestnik Akademii nauk SSSR. – 1983. – No. 3. – P. 33–43. (In Russian)]
29. Фийашко К.С., Кривогина Д.Н. Метод комплексного оценивания экологической составляющей среды на примере Кировского района г. Пермь // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 84–93. [Fiyashko, K.S., Krivogina, D.N. A Method for a Comprehensive Assessment of the Ecological Component of the

- Environment Based on a Case Study of the Kirovsky District of the Perm City // *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – P. 84–93. (In Russian)]
30. Алферов В.И., Баркалов С.А., Бурков В.Н. и др. Прикладные задачи управления строительными проектами. – М.: Ай Пи Эр Медиа, 2021. – 784 с. [Alferov, V.I., Barkalov, S.A., Burkov, V.N., et al. *Prikladnye zadachi upravleniya stroitel'nymi proektami*. – М.: IPR Media, 2021. – 784 s. (In Russian)]
31. Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В. Комплексное оценивание в задачах регионального управления – М.: ИПУ РАН, 2002. – 58 с. [Andronnikova, N.G., Burkov, V.N., Leont'ev, S.V. *Kompleksnoe ocenivanie v zadachah regional'nogo upravleniya* – М.: IPU RAN, 2002. – 58 s. (In Russian)]
32. Стерник С.Г., Алексеев А.О., Алексеева И.Е., Ясницкий В.Л. Сравнительный анализ методов экономико-математического моделирования массовой оценки жилой недвижимости // *Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века*. – 2021. – С. 215–221. [Sternik, S.G., Alekseev, A.O., Alekseeva, I.E., Jasnitskiy, V.L. *Sravnitel'nyy analiz metodov jekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya massovoj ocenki zhiloy nedvizhimosti* // *Iskusstvennyy intellekt v reshenii aktual'nyh social'nyh i jekonomicheskikh problem XXI veka*. – 2021. – P. 215–221. (In Russian)]
33. Alekseev, A. Identification of Integrated Rating Mechanisms with Non-serial Structures of Criteria Tree // *Proceedings of 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*. – Liptsk, 2021. – P. 599–603. – DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632221
34. Alekseev, A.O. Identification of Integrated Rating Mechanisms Based on Training Set // *Proceedings of the 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*. – 2020. – P. 398–403. – DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280751
35. Burkov, V.N., Sergeev, V.A., Korgin, N.A. Identification of Integrated Rating Mechanisms as Optimization Problem // *IEEE Access*. – 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247638
36. Korgin, N., Sergeev, V. Identification of Integrated Rating Mechanisms on Complete Data Sets // *Proceedings of the IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 610–616.
37. Сергеев В.А., Коргин Н.А. Исследование чувствительности дискретной функции для решения задачи синтеза МКО на основе дискретных наборов данных // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Материалы мультиконференции. В 4-х томах. – Волгоград, 2023. – Т. 2. – С. 345–348. [Sergeev, V.A., Korgin, N.A. *Issledovanie chuvstvitel'nosti diskretnoj funkcii dlja resheniya zadachi sinteza MKO na osnove diskretnykh naborov dannyh* // XVI Vserossijskaja mul'tikonferencija po problemam upravleniya (MKPU-2023): Materialy mul'tikonferencii. V 4-h tomah. – Volgograd, 2023. – Vol. 2. – P. 345–348. (In Russian)]
38. Сергеев В.А. Разработка методов анализа и синтеза механизмов комплексного оценивания на основе наборов дискретных данных: специальность 2.3.4 «Управление организационными системами»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2024. – 120 с. [Sergeev, V.A. *Razrabotka metodov analiza i sinteza mehanizmov kompleksnogo ocenivaniya na osnove naborov diskretnykh dannyh: special'nost' 2.3.4 «Upravlenie organizacionnymi sistemami»*: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandida-ta tehniceskikh nauk. – Moscow, 2024. – 120 s. (In Russian)]
39. Sergeev, V.A., Korgin, N.A. Identification of Integrated Rating Mechanisms as an Approach to Discrete Data Analysis // *IFAC-PapersOnLine*. – 2021. – Vol. 54, Iss. 13. – P. 134–139.
40. Sergeev, V.A. Design of Integrated Rating Mechanisms Based on Separating Decomposition // *Control Sciences* – 2022. – No. 6. – P. 2–10.
41. Блачев Р.Н. Особенности процедуры бинарной агрегации многокритериальных экспертных оценок // *Автоматика и телемеханика*. – 1997. – № 5. – С. 126–132. [Blachev, R.N. *Peculiarities of the Binary Aggregation Procedure for Multi-criterial Expert Decisions* // *Automation and Remote Control*. – 1997. – Vol. 58, no. 5. – P. 817–821.]
42. Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б. и др. Комплексное оценивание и планирование развития региона. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. – 52 с. [Levintal', A.B., Efremenko, V.F., Gusev, V.B., et al. *Kompleksnoe otsenivanie i planirovanie razvitiia regiona*. – Moscow: Institut problem upravleniia im. V.A. Trapeznikova RAN, 2006. – 52 s. (In Russian)]
43. Бурков В.Н., Гоацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления безопасностью. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 160 с. [Burkov, V.N., Goacianskiy, E.V., Dzubko, S.I., Shhepkin, A.V. *Modeli i mehanizmy upravleniya bezopasnost'ju*. – Moscow: SINTEG, 2001. – 160 s. (In Russian)]
44. Буркова И.В., Толстых А.В., Уандыков Б.К. Модели и методы оптимизации программ обеспечения безопасности // *Проблемы управления*. – 2005. – № 1. – С. 51–55. [Burkova, I.V., Tolstykh, A.V., and Ouandykov, B.K. *Models and Methods of Security Insurance Programs* // *Control Sciences*. – 2005. – No. 1. – P. 51–55. (In Russian)]
45. Бурков В.Н., Буркова И.В., Губко М.В. и др. Механизмы управления: управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с. [Burkov, V., Goubko, M., Kondrat'ev, V., et al. *Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations*. – New York: Nova Science Publishers, 2013.]
46. Бурков В.Н., Буркова И.В., Попок М.В. Метод дихотомического программирования // *Управление большими системами*. – 2004. – № 9. – С. 57–75. [Burkov, V.N., Burkova, I.V., Popok, M.V. *The Method of Dychotomic Programming* // *Large-Scale Systems Control*. – 2004. – No. 9. – P. 57–75. (In Russian)]
47. Буркова И.В. Метод дихотомического программирования в задачах управления проектами. – Воронеж: ВГАСУ, 2004. – 100 с. [Burkova, I.V. *Metod dikhotomicheskogo programmirovaniya v zadachakh upravleniya proektami*. – Voronezh: VGASU, 2004. – 100 s. (In Russian)]
48. Рей А.С., Широкий А.А. Комплексная оценка информационных рисков. II: Алгоритм идентификации структуры дерева комплексной оценки интегрального информационного риска // *Управление большими системами*. – 2024. – Вып. 111. – С. 97–117. [Rey, A.S., Shirokiy, A.A. *Complex Information Risks Assessment. II: Algorithm for Identifying the Structure of the Tree of Integrated Information Risk Assess-*



- ment // Large-Scale Systems Control – 2024. – Iss. 111. – P. 97–117. (In Russian)]
49. Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А. и др. Моделирующий комплекс для анализа неблагоприятных сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 74–79. [Bogomolov, A.S., Ivashchenko, V.A., Kushnikov, V.A. et al. Modeling Complex for Critical Events Combinations Analysis in Aviation Transport Systems // Control Sciences. – 2018. – No. 1. – P. 74–79. (In Russian)]
 50. Filimonyuk, L., Bobrov, D., Baklashov, A., Zavalov, E. The Methods for Aviation Systems' Safety Analysis during Combinations of Dangerous Heterogeneous Events Including Human Factor // Advances in Systems Science and Applications. – 2025. – Vol. 2025. – Iss. 1. – P. 99–107.
 51. Filimonyuk, L. Models and Methods for a Safe Aviation Transport Systems' Functioning Subject to the Human Factor // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54. – P. 627–630.
 52. Зубков Б.В., Макаров В.П. Вероятностная оценка ошибки при техническом обслуживании воздушных судов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2011. – № 174. – С. 12–17. [Zubkov, B.V., Makarov, V.P. Probability Estimation of the Human Error at Aircraft Maintenance // Civil Aviation High Technologies. – 2011. – No. 174. – P. 12–17. (In Russian)]
 53. Измайлова Д.З., Вагнер Р.А., Посмык А.О. Эксплуатационные риски на воздушном транспорте и в деятельности аэропорта // Управление, экономика и право: проблемы, исследования, результаты: Сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2022. – С. 138–141. [Izmailova, D.Z., Wagner, R.A., Posmyk, A.O. Operational risks in air transport and airport operations // Upravlenie, jekonomika i pravo: problemy, issledovanija, rezul'taty: Sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Penza, 2022. – P. 138–141. (In Russian)]
 54. Отчет о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в первом полугодии 2025 г. – Москва: Межгосударственный авиационный комитет, 2025. [Flight Safety Level of the Contracting States of the Agreement on Civil Aviation and Use of Airspace in the First Half of 2025. – Moscow: Interstate Aviation Committee, 2025. (In Russian)]
 55. IATA Annual Security Report. – 2024th edition. – Montreal: International Air Transport Association, 2024.
 56. Правила расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации: текст с изменениями на 16 мая 2024 года (утв. Постановлением правительства от 16 июня 1998 № 609). – М: Российская газета, 1998. [Rules for the Investigation of Aviation Accidents and Incidents involving Civil Aircraft in the Russian Federation: text as amended on May 16, 2024 (approved by the Government of the Russian Federation By Government Decree No. 609 of June 16, 1998). – Moscow: Rossiiskaya Gazeta, 1998. (In Russian)]
 57. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. Aircraft Accident and Incident Investigation. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2016.
 58. ICAO Doc 10004. Global Aviation Safety Plan 2026–2028. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2025.
 59. Карсункин Е.В. Безопасность полетов. Классификация и категоризация авиационных событий: учебно-методическое пособие. – Ульяновск: УИ ГА, 2024. – 66 с. [Karsunkin, E.V. Bezopasnost' poletov. Klassifikacija i kategorizacija aviacionnyh sobytij: uchebno-metodicheskoe posobie. – Ul'janovsk: UI GA, 2024. – 66 s. (In Russian)]
 60. Бурков В.Н., Буркова И.В., Щепкин А.В. Метод синтеза системы комплексного оценивания // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – № 4. – С. 63–72. [Burkov, V.N., Burkova, I.V., Shchepkin, A.V. Method of Synthesis of the Integrated Assessment System // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2020. – No. 4. – P. 63–72 (In Russian)]
 61. ICAO Doc 7300/9. Convention on International Civil Aviation. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2006.
 62. ICAO Doc 10162. Manual on Monitoring Implementation of Regional and National Aviation Safety Plans. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2023.
 63. ICAO Doc 9859-AN/474. Safety Management Manual. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2018.
 64. ICAO Doc 10161. Global Aviation Safety Roadmap (2023–2025). – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2023.
 65. ICAO Doc 9422. Accident Prevention Manual. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 1984.
 66. ICAO Doc 10011. Manual on Aeroplane Upset Prevention and Recovery Training. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2014.
 67. Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation. Operation of Aircraft. Part II – International General Aviation – Aeroplanes. – 11th edition. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2022.
 68. A Study of Terrain Awareness Warning System Capability and Human Factors in CFIT Accidents 2005–2014. – 1st edition. – Montreal: International Air Transport Association, 2016.
 69. IATA Report. IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2008–2017 Data. – 2018th edition. – Montreal: International Air Transport Association, 2018.
 70. FSF ALAR Tool Kit. Briefing Notes 1.1–8.7 and additional presentation materials. – Moscow: Flight Safety Foundation International (Moscow), 2003. – 591 p.
 71. Российская Федерация. Законы. Воздушный кодекс: текст с изменениями на 31 июля 2025 года (принят Государственной думой 19 марта 1997). – М: Российская газета, 1997. [Air Code of Russian Federation: text as amended on July 31, 2025 (adopted by the State Duma on March 19, 1997). – Moscow: Rossiiskaya Gazeta, 1997. (In Russian)]
 72. Правила разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими в соответствии с международными стандартами Международной организации гражданской авиации (утв. Постановлением Правительства РФ от 12.04.2022 № 642). – М: Российская газета, 2022 – 7 с. [Decree of the Government of the Russian Federation dated April 22, 2022, no. 642 “Regulations for the Development and Application of Aircraft Safety Management Systems, the Collection and Analysis of Data on Hazard and Risk Factors Threatening the Safety of Civil Aircraft Flights, the Storage and Exchange of Such Data in Accordance with the International Standards of the International Civil Aviation Organization,” Moscow: Rossiiskaya Gazeta, 2022. (In Russian)]

73. *Правила использования воздушного пространства Российской Федерации с изменениями на 31 июля 2025 года* (утв. Постановлением Правительства РФ от 11 марта 2010 г. № 138). – М: Российская Бизнес-газета, 2010. [*The Rules for the Use of the Airspace of the Russian Federation as amended on July 31, 2025* (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated March 11, 2010 No. 138). – Moscow: Rossijskaja Biznes-gazeta, 2010. (In Russian)]
74. *Федеральные авиационные правила. Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации: текст с изменениями на 29 мая 2023 года* (утв. Приказом Минтранса РФ от 31 июля 2009 № 128). – М: Российская газета, 2009. [*Federal Aviation Regulations. Preparation and Performance of Flights in the Civil Aviation of the Russian Federation: text as amended on May 29, 2023* (approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 31, 2009 No. 128). – Moscow: Rossiiskaya Gazeta, 2009. (In Russian)]
75. *Федеральные авиационные правила. Требования к членам экипажа воздушных судов, специалистам по техническому обслуживанию воздушных судов и сотрудникам по обеспечению полетов (полетным диспетчерам) гражданской авиации: текст с изменениями на 2 февраля 2024 года* (утв. Приказом Минтранса РФ от 12 сентября 2008 № 147). – М: Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 2008. [*Federal Aviation Regulations. Requirements for Aircraft Crew Members, Aircraft Maintenance Specialists and Flight Support Staff (Flight Controllers) of Civil Aviation: text as amended on February 2, 2024* (approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 147 dated September 12, 2008). – Moscow: B'ulleten' normativnyh aktov federal'nyh organov ispolnitel'noj vlasti, 2008. (In Russian)]
76. *Росавиация*. Письмо от 20 декабря 2024 г., № Исх-44503/02. Информация по безопасности полетов № 11. – М., 2024. – URL: <https://sv-m.favt.ru/public/materials/9/0/2/7/9/902796554a5190f5c673549f212ec4a0.pdf> (дата обращения: 07.11.2025). [*Federal Air Transport Agency. Letter dated December 20, 2024, No. Ex-44503/02. Flight Safety Information No. 11.* – Moscow, 2024. (Accessed November 7, 2025). (In Russian)]
77. *Investigations*. Interstate Aviation Committee. – URL: <https://mak-iac.org/en/rassledovaniya/> (дата обращения: 06.11.2025). [Accessed November 6, 2025].
78. *Controlled Flight Into Terrain (CFIT). Accident Reports*. – URL: <https://aviation-safety.net/> (дата обращения: 06.11.2025). [Accessed November 6, 2025].
79. *Авдеева, З.К., Коврига С.В.* Когнитивные карты для анализа и моделирования в системе стратегического планирования государства // *Управление большими системами: сборник трудов*. – 2024. – № 111. – С. 147–178. [Avdeeva, Z., Kovri-ga, S. Fuzzy-Cognitive-Maps Analysis and Modelling in the State Strategic Planning System // *Large-Scale Systems Control*. – 2024. – No. 111. – P. 147–178. (In Russian)]
80. *Калашников А.О.* Управление информационными рисками организационных систем: механизмы комплексного оценивания // *Информационная безопасность*. – 2016. – Т. 3. – № 1. С. 315–322. [Kalashnikov, A.O. Information Risk Management of Organizational Systems: Integrated Rating Mechanisms // *Information and Security*. – 2016. – Vol. 3, no. 1. P. 315–322. (In Russian)]
81. *Харитонов В.А., Алексеев А.О.* Количественный анализ уровней риска на основе универсальной бинарной модели предпочтения лицом, принимающим решение (ЛПР) // *Вестник ПГУ. Серия: Экономика*. – 2009. – № 2. – С. 13–23. [Kharitonov, V.A., Alekseev, A.O. Quantitative Analysis of Risk Levels Based on the Universal Binary Model of Decision Maker (DM) Preference // *Perm University Herald. Economy*. – 2009. – No. 2. – P. 13–23. (In Russian)]

Статья представлена к публикации руководителем
PPC В. А. Кушиковым.

Поступила в редакцию 11.11.2025,
после доработки 22.02.2026.
Принята к публикации 08.04.2026.

Рей Анастасия Сергеевна – науч. сотрудник,

✉ a.rey@ipu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7921-3062>

Широкий Александр Александрович – канд. физ.-мат. наук,

✉ shiroky@ipu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9130-5541>

Авдеева Зинаида Константиновна – канд. техн. наук,

✉ avdeeva@ipu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4517-6750>

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва

© 2026 г. Рей А. С., Широкий А. А., Авдеева З. К.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.



AN ALGORITHM FOR IDENTIFYING THE DICHOTOMOUS CONVOLUTION GRAPH OF RISK COMPONENTS IN COMPLEX ORGANIZATIONAL SYSTEMS BASED ON ITS EXPERT-DEFINED HIERARCHICAL DECOMPOSITION

A. S. Rey*, A. A. Shiroky**, and Z. K. Avdeeva***

* ** *** Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ a.rey@ipu.ru, **✉ shiroky@ipu.ru, ***✉ avdeeva@ipu.ru

Abstract. Most well-known methods and algorithms for assessing the risks of complex organizational systems are based on the independence assumption of aggregate risk components. At the same time, in practice, risks are often interrelated, i.e., a change in one risk entails a change in others. Therefore, when assessing the aggregate risk of organizational systems, their complexity—the presence of numerous interrelated risks—should be taken into account. This can be done using the integrated rating mechanism as a multicriteria assessment method. In the classical version, its components—the binary trees of criteria and the logical convolution matrices of their values—are set by experts. However, in many cases, experts cannot agree on the structure of the integrated rating tree. In such practical situations, formal methods for synthesizing the tree structure considering the system specifics are in demand. Even if a method yields a nonunique solution, it will ensure the latter's logical validity, and the results can be used in practical tasks. In this paper, the mechanism is extended by replacing the binary integrated rating tree with the dichotomous convolution of aggregate risk components of complex organizational systems, based on its expert-defined decomposition. An algorithm for identifying the dichotomous convolution graph of risk components is proposed, including construction rules and verification criteria. The theoretical results are applied to construct a system for assessing the risk of an aviation accident.

Keywords: risk assessment, aggregate risk, integrated rating, binary tree, dichotomous convolution, hierarchical risk decomposition, risk of an aviation accident.