

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТИЗОВАННОГО ПОДХОДА¹

И. Г. Шидловский

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»,

Москва, Россия

Д. А. Гусев

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,

Москва, Россия

О. А. Свиридова

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,

Москва, Россия

Г. Л. Бродецкий

Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»,

Москва, Россия

В статье предложен модифицированный алгоритм многокритериальной оптимизации управления запасами в условиях неопределенности, основанный на использовании стандартизованных данных для представления показателей частных критериев. Данный подход направлен на устранение феномена неадекватного выбора, при котором критерии с меньшими порядками значений практически не влияют на итоговое решение из-за дисбаланса в их численных диапазонах. Показано, что переход к стандартизованным данным позволяет нивелировать искажающее влияние разнородности шкал измерений и обеспечивает соизмеримость вклада каждого критерия в интегральную оценку альтернатив. В отличие от ранее предложенного подхода с использованием обобщенных данных новая модификация демонстрирует сопоставимую эффективность в устранении феномена неадекватного выбора, но при этом приводит к иному ранжированию альтернатив, расширяя арсенал методов многокритериального анализа. На примере задачи выбора логистического посредника и стратегии управления запасами продукции в условиях неопределенности спроса и задержек поставок проведена численная верификация алгоритма. Установлено, что применение стандартизованных данных позволяет в ряде случаев устраниить влияние феномена неадекватного выбора. Результаты исследования имеют практическую значимость для разработки корпоративных систем поддержки принятия решений, обеспечивающих сбалансированный учет множества противоречивых критериев в условиях неопределенности.

Ключевые слова: фактор неопределенности, стандартизованные критерии выбора, стратегия управления запасами продукции, многокритериальный анализ.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00339,
<https://rscf.ru/project/24-21-00339/>

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF RESOURCE MANAGEMENT IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY IN FORMALIZING INITIAL DATA BASED ON STANDARDIZED APPROACH

Ivan G. Shidlovskiy

Plekhanov Russian University of Economics;
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Denis A. Gusev

Plekhanov Russian University of Economics,
Moscow, Russia

Olga A. Sviridova

Plekhanov Russian University of Economics;
Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russia

Gennadiy L. Brodetskiy

National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

The article puts forward a modified algorithm of multi-criteria optimization of stock management in conditions of uncertainty based on using standardized data to present figures of particular criteria. The approach aims at elimination of inadequate choice phenomenon, when criteria with lower order of values can hardly affect the final solution due to misbalance in their numerical ranges. It was shown that transit to standardized data can help smooth the distorting effect of various scales of measurements and provide commensurability of each criterion contribution to the integral estimation of alternatives. In contrast to the earlier approach using generalized data the new modification shows comparable efficiency in elimination of inadequate choice phenomenon and provides another ranging of alternatives by widening a set of methods of multi-criteria analysis. Quantitative verification of algorithm was conducted by resolving the task of choosing logistic intermediary and strategy of product stock management in conditions of uncertainty in demand and delays in delivery. It was found out that the use of standardized data gives a chance in some cases to eliminate inadequate choice phenomenon. The research findings are important for developing corporate systems of decision-making support, which can ensure well-balanced account of multiple controversial criteria in conditions of uncertainty.

Keywords: uncertainty factor, standardized criteria of choice, strategy of product stock management, multi-criteria analysis.

Введение

Современные цепочки поставок функционируют в условиях неопределенности, вызванной геополитической турбулентностью, нарушениями устоявшихся логистических маршрутов и высокой волатильностью потребительского спроса [1]. Эти вызовы актуализируют потребность в совершенствовании методологического аппарата управления запасами, выдвигая на первый план задачи, которые не могут быть адекватно ре-

шены в рамках классических детерминированных моделей. В частности, принятие решений о стратегиях поставок и выборе логистических партнеров все чаще требует одновременного учета множества противоречивых критериев – от минимизации операционных издержек до управления финансовыми рисками, а также работы в условиях неопределенности относительно ключевых параметров внешней среды, таких как спрос и надежность поставщиков.

Сложность подобных задач обуславливает их естественную формулировку в парадигме многокритериального принятия решений (MCDM). Однако прямое применение стандартных алгоритмов MCDM наталкивается на фундаментальную методологическую проблему, известную как феномен неадекватного выбора. Этот феномен проявляется, когда существенный дисбаланс в порядках величин различных частных критериев приводит к тому, что критерии с меньшими численными значениями фактически исключаются из процесса принятия решения. В результате итоговый выбор может восприниматься лицом, принимающим решение (ЛПР), как континтуитивный и слабо обоснованный, поскольку он не отражает комплексно все заявленные приоритеты, а определяется одним-двумя доминирующими показателями. Таким образом, существует острая потребность не просто в учете неопределенности и многокритериальности, но и в разработке специальных механизмов, обеспечивающих сбалансированное и адекватное влияние всех значимых факторов на конечный результат.

Настоящее исследование направлено на решение указанной методологической проблемы за счет синтеза аппарата многокритериальной оптимизации и теории принятия решений в условиях неопределенности с принципиально новым подходом к формализации исходных данных. Возможности такой модификации соответствующих алгоритмов оптимизации были рассмотрены в ряде работ [3; 4; 13; 15]. В отличие от предыдущих работ [4; 15], где для устранения феномена неадекватного выбора предлагался переход к так называемым обобщенным данным, в данной статье разрабатывается и апробируется модифицированный алгоритм, основанный на использовании стандартизованных данных для представления показателей частных критериев. Такой подход позволяет нивелировать искажающее влияние разнородности шкал измерений и обеспечивает соизмеримость вклада каждого

критерия в интегральную оценку альтернатив. Представленное в этой статье продолжение таких исследований имеет следующее ограничение: анализируемые решения о поставках при управлении запасами задаются конечным числом конкретных альтернатив. При этом фактор неопределенности [4; 15] формализуется на основе задания полной группы анализируемых событий [6; 16].

Возможности учета фактора неопределенности при многокритериальной оптимизации

Процедура выбора наилучшего варианта в условиях неопределенности базируется на специализированном алгоритме, детально рассмотренном нами ранее [13]. Важной особенностью данного подхода является возможность учета субъективного отношения ЛПР к характеру неопределенности, присутствующей в исходных данных.

Сегодня для процедур многокритериальной оптимизации с учетом фактора неопределенности актуальна методология принятия решений по многим критериям (multiple criteria decision making – MCDM [19]). При этом отметим, что рамки данного исследования предполагают рассмотрение конкретного инструментария для многокритериальной оптимизации на дискретном множестве решений: использование критериев выбора, относящихся к прямому типу [7-9; 18]. Анализ модификаций указанных критериев, направленных на учет неопределенности, проводится с опорой на научные результаты [5; 10; 11; 14; 20].

Отмеченный выше специальный подход к синтезу процедур многокритериального выбора с процедурами принятия решений в условиях неопределенности для задач выбора стратегии поставок заказов при управлении запасами нуждается в ряде модификаций для его практической реализации. Ранее нами была представлена модификация (на основе использования обобщенных данных) [4], позволяющая

устранять специальный нежелательный феномен неадекватного выбора [2]. В частности, на результат оптимизации некоторые частные критерии фактически не окажут влияния. В данной статье представлен специальный подход к математическому моделированию задач указанного типа. Он отличается от подхода, представленного ранее [4; 15], тем, что потребуется представлять показатели задаваемых частных критериев в ином специальном виде, а именно в формате стандартизованных данных. Такой подход позволит устраниить указанный выше нежелательный феномен неадекватного выбора. Более того, он может расширить арсенал методов оптимизации при многих критериях, поскольку обеспечит иное ранжирование анализируемых альтернатив.

Особенности рассматриваемого феномена неадекватного выбора и возможности его устранения

Формализация постановки задачи многокритериального выбора из дискретного множества достаточно часто реализуется в табличной форме [2]. Структура такой таблицы предполагает следующее: строки соответствуют анализируемым альтернативам X_i ($i = 1, \dots, m$), в то время как столбцы соответствуют частным критериям C_k ($k = 1, \dots, N$). Для заполнения значений ячеек ik используются значения a_{ik} (оценка альтернативы X_i с позиции частного критерия C_k). Дополнительно вводится результирующий столбец F_i для каждой из альтернатив X_i . Например, в случае постановки задачи, требующей максимизации всех частных критериев $C_k \rightarrow \max$, и при использовании в качестве агрегирующей функции взвешенной суммы расчет значений F_i осуществляется в соответствии с выражением

$$F_i = \sum_{k=1}^N w_k a_{ik},$$

при этом w_k представляет собой весовой коэффициент критерия C_k . Наилучшая альтернатива должна максимизировать такой показатель.

Реализация арифметических действий процедур выбора может приводить к нежелательным ситуациям [4; 15]. Что касается систематизации различных аспектов неадекватного выбора, то в научной литературе [2] представлена их классификация, акцентированная на тех проявлениях, которые имеют наибольшую значимость для сферы логистики и управления цепями поставок. Аналогично результатам [4; 15] центральным феноменом, наблюдающимся в нашей симуляции, оказалось искающее влияние, порождаемое существенной несогласованностью в численных порядках значений различных частных критериев. Следствием такой ситуации становится формальное, а не фактическое участие всех критериев в процессе вычисления интегральной оценки, что в свою очередь ведет к принятию решения, которое может восприниматься ЛПР как не вполне адекватное и обоснованное.

Следуя методике, представленной в статье О. А. Косорукова и О. А. Свиридовай [5], процедура оценки факта воздействия феномена несогласованности порядков значений частных критериев осуществляется посредством проверки устойчивости итогового решения к исключению отдельных критериев из анализа. Факт присутствия феномена считается установленным, если последовательное удаление одного или нескольких столбцов таблицы, соответствующих частным критериям, не приводит к изменению выбранной оптимальной альтернативы в соответствии с заданным правилом оптимизации. Следовательно, те критерии, устранение которых не оказывает влияния на конечный результат, фактически не участвуют в формировании решения, что ставит под сомнение корректность оценки (целесообразность их включения в исходную модель) и свидетельствует о ее методологической недостаточности.

Проиллюстрируем данный подход на примере использования в качестве агрегирующей функции взвешенной суммы, имеющей вид

$$F_i = \sum_{k=1}^N w_k a_{ik} \rightarrow \max_i.$$

Вероятность возникновения феномена существенно возрастает, когда в структуре целевой функции присутствует доминирующее слагаемое $w_k a_{ik}$, значительно превышающее по величине все остальные компоненты суммы. Подобная диспропорция может приводить к ситуации, при которой выбор альтернативы фактически определяется исключительно одним критерием C_k , тогда как вклад остальных критериев с относительно малыми слагаемыми оказывается пренебрежимо малым в общей оценке.

Эмпирическая проверка наличия данного эффекта предусматривает проведение серии вычислительных экспериментов, в рамках которых осуществляется многократный расчет значений целевой функции с последовательным исключением из рассмотрения тех частных критериев, вклад которых представляется незначительным. Сохранение неизменным выбора наилучшей альтернативы после удаления конкретного критерия служит подтверждением того, что данный критерий не оказывает влияния на результат. В противном случае влияние критерия признается существенным.

Для получения комплексного представления о структуре влияния частных критериев необходимо итеративное выполнение указанной процедуры для всех критериев, в отношении которых существует предположение о нерелевантности.

Одним из путей нейтрализации воздействия описанного феномена является применение методологии перехода к так называемым стандартизованным данным в рамках решаемой оптимизационной задачи. При реализации рассматриваемого метода производится преобразование исходных показателей в стандартизованную форму с учетом весовых коэффициентов согласно следующему соотношению [2]:

$$\frac{w_k \cdot a_{ijk}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ijk}^2}}.$$

Все последующие процедуры многокритериального анализа, представленные в данной статье, включая этап агрегирования оценок и выбора оптимальной альтернативы, основываются исключительно на применении полученных стандартизованных критерии выбора.

Особенности алгоритма многокритериального выбора в условиях неопределенности при использовании стандартизованных данных

В качестве методологической основы для разработки модифицированной процедуры выбора выступает алгоритм, предназначенный для решения задач многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности [4; 15]. В данном разделе предлагается его краткое изложение с учетом принципиальной модификации. Основное изменение, вносимое в структуру алгоритма, затрагивает шаг 4, ответственный за подготовку и представление данных для последующих оптимизационных процедур: на этом этапе вместо использования исходных значений производится обязательный переход к стандартизованным данным для исключения воздействия феномена несогласованности порядка значений.

Шаг 1. Формализация задачи многокритериального выбора. На начальном этапе производится четкое определение основных элементов задачи оптимизации. Формируется исчерпывающий список всех рассматриваемых альтернатив X_i (где $i = 1, 2, \dots, m$) и устанавливается система частных критериев оценки C_k (где $k = 1, \dots, N$). Для каждого критерия в обязательном порядке назначается весовой коэффициент w_k . Все частные критерии требуют направления максимизации. Кроме того, необходимо выбрать оператора свертки многокритериальных оценок.

Шаг 2. Задание полной группы учитываемых событий и критерия оптимизации в условиях неопределенности. Второй шаг подразумевает идентификацию и формальное описание полной группы взаимо-

исключающих случайных событий θ_j , где $j = 1, 2, \dots, n$. Также производится выбор критерия, отражающего степень оптимизма/пессимизма ЛПР и его отношение к риску. Этот критерий будет применяться к итоговой матрице последствий для выбора наилучшего решения.

Шаг 3. Определение показателей частных критериев анализируемых альтернатив для событий полной группы. На третьем шаге выполняется заполнение многомерной матрицы данных. Для каждой альтернативы X_i и для каждого из возможных событий θ_j производится моделирование значений частных критериев $(a_{ij1}; \dots; a_{ijk}; \dots; a_{ijN})$. Здесь a_{ijk} является значением по частному критерию C_k для альтернативы X_i (напомним, при реализации события).

Шаг 4. Переход к стандартизованным данным в формате частных критериев. Для анализируемой альтернативы X_i полученный вектор $(a_{ij1}; \dots; a_{ijk}; \dots; a_{ijN})$ преобразуется следующим образом: требуется реализовать процедуры перехода к новому вектору \vec{V}_{ij} , где $\vec{V}_{ij} = (V_{ij1}; \dots; V_{ijk}; \dots; V_{ijN})$.

Указанный переход реализуется по формуле

$$V_{ijk} = \frac{w_k \cdot a_{ijk}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ijk}^2}}.$$

Шаг 5. Формирование матрицы полезностей для учета фактора неопределенности. На пятой стадии алгоритма выполняется ключевой переход от многокритериальных оценок к агрегированным показателям, пригодным для анализа в условиях неопределенности. Формируется матрица полезностей $B = (b_{ij})$, где каждый элемент b_{ij} – полезность соответствующего результата для альтернативы X_i при реализации сценария внешней среды θ_j . В контексте данной методики, где в качестве оператора свертки используется взвешенная сумма, значение полезности b_{ij} рассчитывается как сумма всех стандартизованных оценок альтернативы X_i для события θ_j , а именно $b_{ij} = V_{ij1} + \dots + V_{ijN}$. Полученная матрица служит основой для финального выбора,

так как в компактной форме отражает обобщенные последствия всех возможных решений.

Шаг 6. Выбор наилучшей альтернативы. Финальный шаг алгоритма нацелен на идентификацию единственной наилучшей альтернативы на основе построенной матрицы полезностей. Для этого к матрице полезностей B добавляется дополнительный столбец, в который для каждой строки (альтернативы) заносится значение, вычисленное в соответствии с заданным на втором шаге критерием для условий неопределенности. В случае применения критерия Гурвица, который будет детально проиллюстрирован в численном примере, показатель для каждой альтернативы рассчитывается по формуле

$$F_i = c \cdot \min_j \{b_{ij}\} + (1 - c) \cdot \max_j \{b_{ij}\},$$

объединяющей пессимистический и оптимистический подходы. Обязательным параметром для этого критерия является коэффициент c ($0 \leq c \leq 1$), отражающий степень пессимизма ЛПР.

Численный пример оптимизации стратегии управления запасами при многих критериях с учетом фактора неопределенности

В качестве демонстрационного примера рассматривается практическая задача оптимизации управления запасами парфюмерной продукции, поставляемой из дружественной страны в Московскую область [5]. Для обеспечения эффективного управления запасами в рамках данных поставок необходимо учесть колебания спроса (представленные в сценарном формате) и возможные задержки груза в процессе доставки (в зависимости от используемого логистического посредника). Дополнительной составляющей задачи является выбор логистического посредника для организации перевозки. Для сохранения методической наглядности и упрощения восприятия материала исследование ограничено анализом двух ключевых логистических посредников, хотя разработанный

алгоритм обладает свойством масштабируемости и допускает включение произвольного количества участников с различным распределением долей поставок.

Моделирование факторов неопределенности реализовано через три дискретных сценария изменения спроса – D_1 (пессимистичный), D_2 (базовый) и D_3 (оптимистичный), вероятности наступления которых априори неизвестны. При этом сценарные условия поставок, включая параметры задержек, находятся в прямой корреляционной зависимости от реализуемой модели спроса.

Учет задержек необходимо реализовать только при использовании услуг второго посредника (ввиду превышения им фактора грузовместимости, что может приводить к различным задержкам в поставках). При этом априори принимается абсолютная надежность первого посредника, исключающая возможность задержки поставок. Второй посредник характеризуется переменным уровнем надежности, выражаящимся в различных объемах годовых потерь от задержек в зависимости от состояния рыночного спроса. На основе экспертной оценки определены конкретные значения этих потерь для каждого сценария: $S_2(D_1)$ соответствует потерям при низком спросе; $S_2(D_2)$ – при среднем; $S_2(D_3)$ – при высоком.

Реализация алгоритма выбора наилучшего решения начинается с формирования перечня анализируемых альтернатив. Формирование множества альтернативных решений в данной задаче обусловлено комбинацией двух ключевых факторов: выбора стратегии ориентации на определенный сценарий спроса и определения логистического посредника. В результате структурного анализа возможных комбинаций было сформировано шесть альтернативных стратегий, представленных в виде упорядоченных пар: $X_1 (D_1; \Pi_1)$; $X_2 (D_1; \Pi_2)$; $X_3 (D_2; \Pi_1)$; $X_4 (D_2; \Pi_2)$, $X_5 (D_3; \Pi_1)$; $X_6 (D_3; \Pi_2)$. В данной системе обозначений первый элемент пары отражает выбранный сценарий спроса (D_1 , D_2 или D_3), а

второй элемент идентифицирует выбранного логистического посредника (Π_1 или Π_2).

Отметим, что в формате рассматриваемой задачи задаются пять частных критериев, которые обозначаются C_1 – C_5 . При работе с показателями расходов применяется следующее преобразование: критерии определяются как разница между предельно допустимым уровнем затрат, установленным ЛПР, и их фактическим значением. Данный подход обеспечивает выполнение условия максимизации – чем ниже фактические расходы относительно критического уровня, тем выше значение критерия, что соответствует улучшению показателя:

- C_1 – отклонение фактических годовых расходов на организацию перевозки грузов от установленного лимита в 17 000 у. е.;
- C_2 – отклонение фактических годовых расходов на обеспечение хранения продукции от установленного лимита в 2 400 у. е.;
- C_3 – отклонение фактических потерь от задержек в поставках партий продукции от максимально допустимого значения в 90 000 у. е.;
- C_4 – отклонение фактических потерь от ошибок прогнозирования от максимально допустимого значения в 30 000 у. е.;
- C_5 – отклонение фактических годовых расходов на транзакционные издержки от установленного лимита в 500 у. е.

Для агрегации частных критериев применяется взвешенная сумма с весовыми коэффициентами: $w_1 = 0,3$; $w_2 = 0,1$; $w_3 = 0,2$; $w_4 = 0,2$; $w_5 = 0,2$. В качестве критерия многокритериального выбора задается метод взвешенной суммы оценок частных критериев.

Для учета фактора неопределенности на втором шаге алгоритма задается полная группа из 6 событий: $\theta_1 \rightarrow (D_1S_1)$; $\theta_2 \rightarrow (D_2S_1)$; $\theta_3 \rightarrow (D_3S_1)$; $\theta_4 \rightarrow (D_1S_2)$; $\theta_5 \rightarrow (D_2S_2)$; $\theta_6 \rightarrow (D_3S_2)$. Например, событие $\theta_1 \rightarrow (D_1S_1)$ соответствует ситуации наступления случайного события θ_1 , при котором реализу-

ется сценарий спроса D_1 и сценарий задержек S_1 у второго посредника.

Дополнительно на втором шаге производится задание критерия выбора в условиях неопределенности. Используем критерий Гурвица. Для полноты анализа вычисления осуществляются для трех значе-

ний уровня пессимизма: $c = 0,05$; $c = 0,5$; $c = 0,85$.

Третий шаг алгоритма предполагает расчет показателей частных критериев для всех альтернатив применительно к событиям полной группы. Для этого используются исходные данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные для рассматриваемой задачи многокритериального выбора
в условиях неопределенности**

Показатель		Обозначение	Значение	Единица измерения
Спрос	Низкий спрос на продукцию (первый сценарий)	D_1	1 600	шт.
	Средний спрос на продукцию (второй сценарий)	D_2	2 000	ед.
	Высокий спрос на продукцию (третий сценарий)	D_3	2 300	ед.
Цена закупки		C_{Π}	380	у. е./ед.
Выручка от реализации единицы товара		C_s	430	у. е./ед.
Прибыль от реализации единицы товара		P_{Π}	50	у. е./ед.
Транзакционные издержки	у посредника I	-	100	у. е.
	у посредника II	-	400	у. е.
Требуемые отчисления от прибыли на единицу товара		L_{Π}	10	у. е./ед.
Стоимость доставки	посредником I	C_{01}	2 500	у. е./партия
	посредником II	C_{02}	2 200	у. е./партия
Стоимость хранения единицы товара за год	посредником I	C_{h1}	12	у. е./ед.
	посредником II	C_{h2}	11	у. е./ед.
Потери из-за задержек у второго посредника	с учетом реализованного сценария по спросу	$S_2(D_1)$	50 000	у. е.
		$S_2(D_2)$	70 000	у. е.
		$S_2(D_3)$	80 000	у. е.

Для определения оптимальной стратегии управления запасами используется EOQ-модель, предполагающая учет рентабельности анализируемой цепи поставок. Несмотря на то, что с учетом текущих тенденций трансформации цепей поставок желательно использовать специальные EOQ-модели [17], для которых разработаны представленные в данной статье оптимизационные процедуры, оценка оптимального размера заказа производится по формуле (1) для сохранения возможности сопоставления результатов предлагаемых в данной статье методов оптимизации с

предложенными ранее [4; 15]. Процедуры оптимизации реализуются с учетом концепции временной ценности денег [18; 12].

Используемая модель предполагает, что издержки хранения учитываются по занимаемым местам:

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2C_0D}{C_h + r \cdot C_{\Pi}}} , \quad (1)$$

где r – показатель рентабельности цепи поставок [18]:

$$r = \frac{(P_{\Pi} - L_{\Pi})\sqrt{DC_h/2C_0 - C_h}}{C_{\Pi} + \sqrt{C_0C_h/2D}} , \quad (2)$$

где P_{Π} – прибыль от продажи одной единицы товара;

L_{Π} – сумма целевых отчислений от прибыли (для финансирования операционных расходов: оплаты труда, транзакционных издержек, страхования, хеджирования рисков);

D – объем годового потребления;

C_h – годовые издержки хранения единицы товара (в числовом примере такой показатель используется в виде C_{h1} для первого посредника и в виде C_{h2} для второго посредника);

C_0 – расходы на организацию одной доставки продукции; это затраты, которые не зависят от объема или размера заказа, поэтому их нельзя отнести к стоимости единицы товара, если не определен размер заказа (в анализируемом примере данный компонент используется в виде C_{01} для случая использования услуг первого посредника и в виде C_{02} для случая использования услуг второго посредника);

C_p – себестоимость единицы товара, включая переменные логистические издержки.

Использование модифицированного алгоритма позволяет оптимизировать выбор стратегий управления запасами при использовании специальных модификаций управления запасами. Итоговый экономический результат в рассматриваемом примере зависит от сценария спроса и задержки доставки, что будет приводить к задержкам в получении выручки. Соответственно, для каждого из сценариев необходимо отдельно провести оценку оптимальных параметров EOQ-модели (с учетом фактора грузовместимости) и смоделировать результат.

Во избежание увеличения объема демонстрация расчетных процедур ограничивается рассмотрением ситуации с внешним воздействием по событию θ_1 (табл. 2).

Таблица 2

Показатели альтернатив по частным критериям C_k применительно к ситуации с внешним воздействием по событию θ_1

Альтернативы	Показатели частных критерииев				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$X_1 (D_1; \Pi_1)$	4 607,64	463,32	90 000	30 000	400
$X_2 (D_1; \Pi_2)$	5 234,36	754,53	90 000	30 000	100
$X_3 (D_2; \Pi_1)$	5 257,99	356,06	90 000	19 600	400
$X_4 (D_2; \Pi_2)$	5 855,29	662,85	90 000	19 800	100
$X_5 (D_3; \Pi_1)$	5 649,73	285,51	90 000	11 800	400
$X_6 (D_3; \Pi_2)$	6 228,95	602,59	90 000	12 150	100

Рассмотрим проведение оценки для альтернативы $X_1 (D_1; \Pi_1)$ по показателям частных критерииев:

1. Оценка C_1 составляет

$$17\ 000 - C_{01} \cdot \frac{D_1}{q_1} = 17\ 000 - 2\ 500 \cdot \frac{1600}{323} = 4\ 607,64.$$

Для оценки значения q_1 (оптимального размера заказа) использована формула (1), для значения r (рентабельности оборотного капитала) – формула (2). При проведении оценки желательно использовать спе-

циальные модификации EOQ-моделей управления запасами [17], однако для сохранения возможности сопоставления результатов при использовании различных методов устранения феномена неадекватного выбора применяемые в данной статье модели соответствуют рассматриваемым ранее [4; 15].

2. Оценка C_2 составляет

$$2\ 400 - C_{h1} \cdot \frac{q_1}{2} = 2\ 400 - 12 \cdot \frac{323}{2} = 463,32.$$

3. Оценка C_3 равна $90\ 000 - 0 = 90\ 000$. Это связано с тем, что при использовании первого посредника (что соответствует альтернативе X_1) отсутствуют задержки поставки.

4. Оценка C_4 рассчитывается как $30\ 000 - 0 = 30\ 000$, так как при реализации события θ_1 не наблюдается ошибок в прогнозировании. Действительно, размер заказа q_1 рассчитывается при ожидании спроса D_1 , а событие θ_1 как раз и предусматривает реализацию спроса D_1 .

5. Оценка C_5 получена как $500 - 100 = 400$.

Кроме того, необходимо обратить внимание на следующее: важно корректно учитывать ситуацию, когда фактический спрос оказывается выше допустимого (относительно стратегии поставок). В таком случае необходимо оценивать объем упущеной прибыли. И наоборот, если имела место перепоставка продукции, необходимо заложить дополнительные затраты, включающие в себя стоимость половины (конкретная доля будет зависеть непосредственно от условий функционирования компании, для которой производятся расчеты) годового хранения избыточного количества поставленного товара.

Из данных табл. 2 очевидно наличие существенного различия в порядках величин: показатели частных критериев C_2 и C_5 по всем альтернативам оказываются на порядок меньшими по сравнению с другими частными критериями. Подобная диспропорция создает предпосылки для возникновения так называемого феномена неадекватного выбора, поскольку процедура оптимизации может оказаться чувствительной лишь к критериям с наибольшими абсолютными значениями и игнорировать вклад остальных.

Для диагностики данного эффекта в контексте решаемой задачи необходима серия сравнительных вычислений, а именно требуется сопоставить решения, полученные при полном наборе критериев, с решениями, найденными после исключения второго и пятого критериев по отдельности и вместе.

В табл. 3 приведены результаты реализации шага 4 алгоритма – нормализации данных: исходные показатели по критериям C_k были подвергнуты стандартизации, после чего им были присвоены обозначения S_k для использования в последующих шагах методики.

Таблица 3
Стандартизованные показатели альтернатив по частным критериям S_k применительно к ситуации с внешним воздействием по событию θ_1

Альтернативы	Стандартизованные показатели частных критериев					Стандартизованный результат для матрицы полезностей в случае реализации события θ_1
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
$X_1 (D_1; \Pi_1)$	0,103	0,035	0,082	0,112	0,112	0,443
$X_2 (D_1; \Pi_2)$	0,117	0,056	0,082	0,112	0,028	0,395
$X_3 (D_2; \Pi_1)$	0,117	0,027	0,082	0,073	0,112	0,411
$X_4 (D_2; \Pi_2)$	0,130	0,049	0,082	0,074	0,028	0,364
$X_5 (D_3; \Pi_1)$	0,126	0,021	0,082	0,044	0,112	0,385
$X_6 (D_3; \Pi_2)$	0,139	0,045	0,082	0,045	0,028	0,339

На финальном этапе предложенной методики осуществляется преобразование исходных показателей в стандартизованную форму (см. табл. 3). Для демонстрации вычислительной процедуры рассмотрим

им альтернативу $X_1 (D_1; \Pi_1)$. Ее стандартизованная оценка по частному критерию S_1 определяется по установленной ранее формуле и составляет

$$\frac{w_1 \cdot a_{111}}{\sqrt{\sum_{i=1}^6 a_{i11}^2}} = \frac{0,3 \cdot 4607,64}{13463,99} = 0,443.$$

На последующем, пятом шаге алгоритма на основе этих агрегированных данных

конструируется матрица полезностей, представленная в табл. 4.

Матрица полезностей в условиях неопределенности

Альтернативы	Стандартизованный экономический результат при возможных внешних воздействиях (в формате полной группы случайных событий)					
	θ_1 (D_1S_1)	θ_2 (D_2S_1)	θ_3 (D_3S_1)	θ_4 (D_1S_2)	θ_5 (D_2S_2)	θ_6 (D_3S_2)
$X_1 (D_1; \Pi_1)$	0,443	0,347	0,120	0,485	0,389	0,162
$X_2 (D_1; \Pi_2)$	0,395	0,321	0,186	0,437	0,363	0,228
$X_3 (D_2; \Pi_1)$	0,411	0,433	0,310	0,391	0,413	0,290
$X_4 (D_2; \Pi_2)$	0,364	0,406	0,372	0,343	0,386	0,352
$X_5 (D_3; \Pi_1)$	0,385	0,423	0,434	0,334	0,372	0,383
$X_6 (D_3; \Pi_2)$	0,339	0,396	0,492	0,287	0,345	0,442

Первый столбец данной матрицы, отвечающий событию θ_1 , полностью базируется на вычисленных ранее совокупных полезностях. В целях компактности изложения детальные расчеты для оставшихся событий полной группы в данной статье не приводятся.

В соответствии с заключительным шагом алгоритма в табл. 5 представлены результаты выбора по критерию Гурвица при различном возможном уровне пессимизма ЛПР, реализованные по данным табл. 4.

Результаты выбора по критерию Гурвица при различных уровнях пессимизма

Альтернативы	Показатели критерия Гурвица		
	при $c = 0,05$	при $c = 0,5$	при $c = 0,85$
$X_1 (D_1; \Pi_1)$	0,467	0,303	0,175
$X_2 (D_1; \Pi_2)$	0,424	0,312	0,224
$X_3 (D_2; \Pi_1)$	0,426	0,362	0,312
$X_4 (D_2; \Pi_2)$	0,403	0,375	0,353
$X_5 (D_3; \Pi_1)$	0,429	0,384	0,349
$X_6 (D_3; \Pi_2)$	0,482	0,390	0,318

Как видно из табл. 5, при $c = 0,05$ для альтернативы $X_1 (D_1; \Pi_1)$ показатель критерия Гурвица составит

$$0,05 \times 0,162 + 0,95 \times 0,485 = 0,467.$$

Таким образом, при $c = 0,05$ и при $c = 0,5$ альтернатива $X_6 (D_3; \Pi_2)$ становится наи-

лучшей, а при $c = 0,85$ наилучшей становится альтернатива $X_4 (D_2; \Pi_2)$.

Проявление феномена неадекватного выбора и возможности его устранения

Для оценки факта проявления феномена неадекватного выбора при модифика-

ции на основе стандартизованных данных (далее такой формат обозначим как формат *A*) приведем итоговые результаты

наилучшего выбора в ситуациях с использованием различных наборов частных критериев (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение результатов наилучшего выбора для рассмотренных наборов частных критериев

Наборы частных критериев	Формат данных	Наилучшие альтернативы по критерию Гурвица		
		при $c = 0,05$	при $c = 0,5$	при $c = 0,85$
С учетом всех частных критериев	<i>A</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_4(D_2; \Pi_2)$
	<i>B</i>	$X_2(D_1; \Pi_2)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$
	<i>C</i>	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$
Без учета второго частного критерия	<i>A</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$
	<i>B</i>	$X_2(D_1; \Pi_2)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$
	<i>C</i>	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$	$X_5(D_3; \Pi_1)$
Без учета пятого частного критерия	<i>A</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_4(D_2; \Pi_2)$
	<i>B</i>	$X_2(D_1; \Pi_2)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$
	<i>C</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$
Без учета второго и пятого частных критериев	<i>A</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_4(D_2; \Pi_2)$
	<i>B</i>	$X_2(D_1; \Pi_2)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$	$X_1(D_1; \Pi_1)$
	<i>C</i>	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$	$X_6(D_3; \Pi_2)$

С целью удобства сравнения полученных результатов с аналогичными, но для ситуаций непосредственного использования других форматов для исходных данных (формат *B* – исходные данные; формат *C* – обобщенные данные) в табл. 6 дополнительно представлены результаты выбора для таких форматов [4; 13; 15].

Результаты, представленные в табл. 6 для формата *B* [4], подтверждают проявление феномена несогласованности порядка значений частных критериев. В частности, второй и пятый частные критерии не оказывают влияния на наилучший выбор. В то же время реализация предложенной модификации (переход к стандартизованным данным, формат данных *A*) приводит к тому, что указанный феномен устраняется в определенных ситуациях. Действительно, при удалении только второго частного критерия при $c = 0,5$ и при $c = 0,85$ наилучший выбор меняется, что подтверждает указанную особенность. Выбор меняется и при удалении только пятого критерия, но именно при $c = 0,85$. При этом при $c = 0,05$ удаление указанных частных критериев не меняет наилучший выбор, т. е. воздействие интересующего нас фе-

номена неадекватного выбора частично сохраняется.

Если сравнить (с точки зрения возможности устранения феномена неадекватного выбора) полученные результаты по стандартизованным данным с теми, что были получены на основе предыдущей модификации [4; 15], то можно сделать следующий вывод: при реализации перехода к обобщенным данным (формат данных *C*) удаление только пятого частного критерия меняет наилучший выбор, однако удаление только второго частного критерия не меняет наилучший выбор. Это значит, что феномен неадекватного выбора устраняется тоже в определенных случаях.

Тем не менее переход к стандартизованным данным приводит к другому наилучшему выбору, нежели при переходе к обобщенным данным, а также при использовании исходных данных. Другими словами, можно говорить о расширении арсенала доступных инструментов много-критериального выбора, причем при сопоставимой эффективности устранения феномена несогласованности порядка значений частных критериев. Разумеется, следует дополнительно принимать во внимание,

что предложенная модификация, как было проиллюстрировано, не может гарантировать исключение (во всех ситуациях) воздействия интересующего нас нежелательного феномена.

Заключение

При реализации многокритериального выбора в условиях неопределенности на дискретном множестве решений могут возникать нежелательные ситуации, известные как феномены неадекватного выбора. Для устранения таких феноменов был предложен модифицированный алгоритм оптимизации таких решений [4; 15]. Модификация была реализована на основе специального подхода для представления исходных данных. В частности, при указанной модификации был использован переход к так называемым обобщенным данным [2]. Это позволило предоставить инструмент для устранения феномена неадекватного выбора.

Нами предложена другая модификация формализации представления исходных данных – в виде соответствующих стандартизованных данных. Использование такой модификации позволяет устранять указанный феномен применительно к раз-

личным ситуациям, а также расширить арсенал инструментов для оптимизации по многим критериям в условиях неопределенности.

По результатам численной иллюстрации предложенного модифицированного алгоритма на примере оптимизации стратегии управления запасами промышленных товаров можно сделать следующий вывод: реализация перехода к стандартизованным данным действительно может устранять воздействие феномена неадекватного выбора, когда некоторые частные критерии фактически могут не оказывать влияние на выбор. В статье дана численная иллюстрация предлагаемого подхода к математическому моделированию при разработке стратегии управления запасами промышленных товаров с учетом необходимости выбора логистического посредника, причем в условиях неопределенности спроса и возможных задержек поставок. При этом в формате такой численной иллюстрации следует учитывать, что предложенная модификация не может во всех случаях гарантировать исключение воздействия рассматриваемого нежелательного феномена.

Список литературы

1. Бродецкий Г. Л., Герами В. Д., Гусев Д. А., Колик А. В. Трансформация цепей поставок в ситуации глобального кризиса // Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН. – 2023. – № 2. – С. 14–23.
2. Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А., Шидловский И. Г. Оптимизация решений по многим критериям в исследованиях логистики : монография. – М. : Инфра-М, 2020.
3. Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А., Шидловский И. Г., Свиридова О. А. Возможности процедур оптимизации в условиях неопределенности при их синтезе с выбором решения по многим критериям // Мягкие измерения и вычисления. – 2023. – № 5. – С. 22–36.
4. Гусев Д. А., Свиридова О. А., Шидловский И. Г., Бродецкий Г. Л. Оптимизация стратегии поставок заказов при управлении запасами по многим критериям в условиях неопределенности // Дискретный анализ и исследование операций. – 2025. – № 1. – С. 28–47.
5. Косоруков О. А., Свиридова О. А. Учет неопределенности спроса при оптимизации системы управления запасами // Логистика. – 2012. – № 6. – С. 12–13.
6. Мушек Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений : монография. – М. : Мир, 1990.
7. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход. – М. : Физматлит, 2004.

8. Подиновский В. В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М. : Наука, 2019.
9. Подиновский В. В. Теория важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений при неопределенности. I. Исходные положения // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 5. – С. 599–607.
10. Baydaş M., Pamučar D. Determining Objective Characteristics of MCDM Methods under Uncertainty: An Exploration Study with Financial Data // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – N 7. – P. 1115.
11. Ben Abdelaziz F., Lang P., Nadeau R. Dominance and Efficiency in Multicriteria Decision under Uncertainty // Theory Decis. – 1999. – Vol. 47. – N 3. – P. 191–212.
12. Brodetskiy G. L. The Inventory Optimisation Taking into Account Time Value of Money and Order Payment Deferrals // International Journal of Logistics Systems and Management. – 2017. – Vol. 28. – N 4. – P. 486–506.
13. Brodetskiy G. L., Gusev D. A., Shidlovskii I. G. Multi-Criteria Optimisation under the Conditions of Uncertainty in Logistics and Supply Chain Management // International Journal of Logistics Systems and Management. – 2021. – Vol. 40. – N 2. – P. 207–227.
14. Gilboa I. Theory of Decision under Uncertainty. – Cambridge : Camb. Univ. Press, 2009.
15. Gusev D. A., Sviridova O. A. Shidlovskii I. G., Brodetskiy G. L. Optimization of Inventory Management Strategies for Order Deliveries Using Multicriteria Decision Making under Conditions of Uncertainty // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2025. – Vol. 19. – N 1. – P. 40–50.
16. Muschick E., Müller P. H. Entscheidungspraxis: Ziele, Verfahren, Konsequenzen. – Berlin : VEB Verl. Technik, 1987.
17. Shidlovskii I. G. Efficiency Estimates of Deliveries Using Any Number of Vehicles for an EOQ Model Considering Delays in Receiving Revenue and Cargo Capacity // Journal of Hunan University Natural Sciences. – 2024. – Vol. 51. – N 2. – P. 19–27.
18. Thakkar J. J. Multi-Criteria Decision Making. – Singapore : Springer, 2021. (Studies in Systems, Decision and Control; Vol. 336).
19. Tzeng G. H., Huang J. J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – Boca Raton : CRC Press, 2011.
20. Zhukovin V. E., Burshtein F. V., Korelov E. S. A Decision Making Model with Vector Fuzzy Preference Relation // Fuzzy Sets and Systems. – 1987. – Vol. 24. – N 1–2. – P. 71–79.

References

1. Brodetskiy G. L., Gerami V. D., Gusev D. A., Kolik A. V. Transformatsiya tsepey postavok v situatsii globalnogo krizisa [Transformation of Supply Chains in a Global Crisis Situation]. *Analiz i prognoz. Zhurnal IMEMO RAN* [Analysis and Forecast. Journal of IMEMO RAS], 2023, No. 2, pp. 14–23. (In Russ.).
2. Brodetskiy G. L., Gusev D. A., Shidlovskiy I. G. Optimizatsiya resheniy po mnogim kriteriyam v issledovaniyakh logistiki: monografiya [Multi-Criteria Optimization of Decisions in Logistics Research, monograph]. Moscow, Infra-M, 2020. (In Russ.).
3. Brodetskiy G. L., Gusev D. A., Shidlovskiy I. G., Sviridova O. A. Vozmozhnosti protsedur optimizatsii v usloviyakh neopredelennosti pri ikh sinteze s vyborom resheniya po mnogim kriteriyam [Possibilities of Optimization Procedures under Uncertainty in Their Synthesis with Multi-Criteria Solution Choice]. *Myagkie izmereniya i vychisleniya* [Soft Measurements and Calculations], 2023, No. 5, pp. 22–36. (In Russ.).
4. Gusev D. A., Sviridova O. A., Shidlovskiy I. G., Brodetskiy G. L. Optimizatsiya strategii postavok zakazov pri upravlenii zapasami po mnogim kriteriyam v usloviyakh

neopredelennosti [Optimization of Order Supply Strategy in Multi-Criteria Inventory Management under Uncertainty]. *Diskretniy analiz i issledovanie operatsiy* [Discrete Analysis and Operations Research], 2025, No. 1, pp. 28–47. (In Russ.).

5. Kosorukov O. A., Sviridova O. A. Uchet neopredelennosti sprosa pri optimizatsii sistemy upravleniya zapasami [Accounting for Demand Uncertainty in Inventory Management System Optimization]. *Logistika* [Logistics], 2012, No. 6, pp. 12–13. (In Russ.).

6. Mushik E., Myuller P. Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy: monografiya [Methods of Making Technical Decisions, monograph]. Moscow, Mir, 1990. (In Russ.).

7. Nogin V. D. Prinyatie resheniy v mnogokriterialnoy srede. *Kolichestvennyy podkhod* [Decision Making in a Multicriteria Environment. Quantitative Approach]. Moscow, Fizmatlit, 2004. (In Russ.).

8. Podinovskiy V. V. Idei i metody teorii vazhnosti kriteriev v mnogokriterialnykh zadachakh prinyatiya resheniy [Ideas and Methods of the Criteria Importance Theory in Multicriteria Decision-Making Problems]. Moscow, Nauka, 2019. (In Russ.).

9. Podinovskiy V. V. Teoriya vazhnosti kriteriev v mnogokriterialnykh zadachakh prinyatiya resheniy pri neopredelennosti. I. Iskhodnye polozheniya [Theory of Criteria Importance in Multicriteria Decision-Making Problems under Uncertainty. I. Basic Principles]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya* [Information Technologies of Modeling and Control], 2010, No. 5, pp. 599–607. (In Russ.).

10. Baydaş M., Pamučar D. Determining Objective Characteristics of MCDM Methods under Uncertainty: An Exploration Study with Financial Data. *Mathematics*, 2022, Vol. 10, No. 7, p. 1115.

11. Ben Abdelaziz F., Lang P., Nadeau R. Dominance and Efficiency in Multicriteria Decision under Uncertainty. *Theory Decis*, 1999, Vol. 47, No. 3, pp. 191–212.

12. Brodetskiy G. L. The Inventory Optimisation Taking into Account Time Value of Money and Order Payment Deferrals. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2017, Vol. 28, No. 4, pp. 486–506.

13. Brodetskiy G. L., Gusev D. A., Shidlovskii I. G. Multi-Criteria Optimisation under the Conditions of Uncertainty in Logistics and Supply Chain Management. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2021, Vol. 40, N 2, pp. 207–227.

14. Gilboa I. Theory of Decision under Uncertainty. Cambridge, Camb. Univ. Press, 2009.

15. Gusev D. A., Sviridova O. A. Shidlovskii I. G., Brodetskiy G. L. Optimization of Inventory Management Strategies for Order Deliveries Using Multicriteria Decision Making under Conditions of Uncertainty. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2025, Vol. 19, No. 1, pp. 40–50.

16. Muschick E., Müller P. H. Entscheidungspraxis: Ziele, Verfahren, Konsequenzen. Berlin, VEB Verl. Technik, 1987.

17. Shidlovskii I. G. Efficiency Estimates of Deliveries Using Any Number of Vehicles for an EOQ Model Considering Delays in Receiving Revenue and Cargo Capacity. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 2024, Vol. 51, No. 2, pp. 19–27.

18. Thakkar J. J. Multi-Criteria Decision Making. Singapore, Springer, 2021. (Studies in Systems, Decision and Control; Vol. 336).

19. Tzeng G. H., Huang J. J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Boca Raton, CRC Press, 2011.

20. Zhukovin V. E., Burshtein F. V., Korelov E. S. A Decision Making Model with Vector Fuzzy Preference Relation. *Fuzzy Sets and Systems*, 1987, Vol. 24, No. 1–2, pp. 71–79.

Сведения об авторах

Иван Геннадьевич Шидловский

кандидат экономических наук, научный сотрудник кафедры математических методов в экономике РЭУ им. Г. В. Плеханова; доцент Высшей школы бизнеса Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 109992, Москва, Стремянный пер., д. 36; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 28/11. E-mail: shdlvsk-ivan@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4690-3988

Денис Александрович Гусев

кандидат экономических наук, доцент кафедры маркетинга РЭУ им. Г. В. Плеханова. Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 109992, Москва, Стремянный пер., д. 36. E-mail: gussev79@mail.ru ORCID: 0000-0002-2173-1270

Ольга Александровна Свиридова

кандидат экономических наук, доцент кафедры математических методов в экономике РЭУ им. Г. В. Плеханова; доцент кафедры моделирования и системного анализа Финансового университета. Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 109992, Москва, Стремянный пер., д. 36; ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2. E-mail: sviridova.oa@rea.ru ORCID: 0000-0001-7606-288X

Геннадий Леонидович Бродецкий

доктор технических наук, профессор, ординарный профессор Высшей школы бизнеса Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Адрес: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 28/11. E-mail: gbrodetskiy@hse.ru ORCID: 0000-0002-3483-1078

Information about the authors

Ivan G. Shidlovskiy

PhD, Research Fellow of the Department of Mathematical Methods in Economics of the PRUE; Associate Professor at the Graduate School of Business of HSE University. Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 109992, Russian Federation. National Research University Higher School of Economics, 28/11 Shabolovka Str., Moscow, 119049, Russian Federation. E-mail: shdlvsk-ivan@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4690-3988

Denis A. Gusev

PhD, Associate Professor of the Department of Marketing of the PRUE. Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 109992, Russian Federation. E-mail: gussev79@mail.ru ORCID: 0000-0002-2173-1270

Olga A. Sviridova

PhD, Associate Professor of the Department of Mathematical Methods in Economics of the PRUE; Associate Professor of the Department of Modeling and System Analysis of the Financial University. Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 109992, Russian Federation; Financial University under the Government of the Russian Federation, 49/2 Leningradskiy Avenue, Moscow, 125167, Russian Federation. E-mail: sviridova.oa@rea.ru ORCID: 0000-0001-7606-288X

Gennadiy L. Brodetskiy

Doctor Technical Sciences, Professor, Ordinary Professor of the Graduate School of Business of HSE University. Address: National Research University Higher School of Economics, 28/11 Shabolovka Str., Moscow, 119049, Russian Federation. E-mail: gbrodetskiy@hse.ru ORCID: 0000-0002-3483-1078