

Коллективный выбор оптимального варианта трассы железнодорожной линии

М.В. Феоктистова✉, В.А. Подвербный

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉feoktistova_mv@irgups.ru

Резюме

Сложность выбора оптимального варианта трассы железнодорожной линии связана с рядом факторов. Принятие решений при многих критериях позволяет учитывать экономический, экологический и социальный аспекты строительства новой железнодорожной линии по одному из запроюктированных вариантов трассы. Коллективное принятие решений предполагает объединение знаний и опыта различных людей для поиска ответов на сложные задачи. В коллективе разные мнения и взгляды на проблему помогают учесть всю необходимую информацию и прийти к наиболее оптимальному заключению. Для анализа полученного результата важно видеть обоснование предпочтений каждого эксперта. В работе рассмотрены три модели принятия коллективных решений: модель Кондорсе, модель Борда и линейная многокритериальная модель. Модель Кондорсе относительно проста для понимания и применения, что делает ее привлекательной при коллективном выборе. Однако при использовании этой модели бывают ситуации, когда решение не может быть принято из-за возникновения нетранзитивности предпочтений на множестве альтернатив. В этом случае следует воспользоваться обобщенным правилом Борда. В задачах, где важен многокритериальный подход, нужно применять линейную многокритериальную модель, позволяющую оценить множество критериев одновременно с учетом их веса. В статье приведен пример использования рассмотренных моделей при коллективном выборе оптимального варианта трассы железнодорожной линии.

Ключевые слова

множество альтернатив, комитет, экспертная группа, ранжирование, многокритериальность, квалификация экспертов, важность критерия, функция предпочтительности, линейные свертки, формализация данных, выбор варианта трассы

Для цитирования

Феоктистова М.В. Коллективный выбор оптимального варианта трассы железнодорожной линии / М.В. Феоктистова, В.А. Подвербный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1 (81). С. 22–34. DOI 10.26731/1813-9108.2024.1(81).22-34.

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 05.03.2024 г.; принята к публикации: 06.03.2024 г.

Collective choice of the optimal railway route option

M.V. Feoktistova✉, V.A. Podverbnyi

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉feoktistova_mv@irgups.ru

Abstract

The difficulty of choosing the optimal route for a railway line is related to a number of factors. Decision-making under many criteria makes it possible to take into account the economic, environmental and social aspects of the construction of a new railway line according to one of the projected route options. Collective decision-making involves combining the knowledge and experience of different people to find solutions to complex tasks. In the team, different opinions and views on the problem help to take into account all the necessary information and come to the most optimal conclusion. To analyze the result obtained, it is important to see the rationale for each expert's preferences. The paper considers three models of collective decision-making: the Condorcet model, the Board model and the linear multi-criteria model. The Condorcet model is relatively easy to understand and apply, which makes it attractive for collective selection. However, when using this model, situations may arise when a decision cannot be made due to the occurrence of non-transitivity of preferences on a set of alternatives. In this case, one should use the generalized Board rule. In tasks where a multi-criteria approach is important, it is necessary to apply a linear multi-criteria model that allows to evaluate many criteria simultaneously, taking into account their weightiness. The article provides an example of the use of the considered models in the collective selection of the optimal route of a railway line.

Keywords

multiple alternatives, committee, expert group, ranking, multi-criteria, expert qualifications, criterion importance, preference function, linear convolution, data formalization, choosing a route option

For citation

Feoktistova M.V., Podverbnyi V.A. Kollektivnyi vybor optimal'nogo varianta trassy zheleznodorozhnoi linii [Collective choice of the optimal railway route option]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 1(81), pp. 22–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.1(81).22-34.

Article info

Received: December 13, 2023; Revised: March 5, 2024; Accepted: March 6, 2024.

Введение

Стремительное развитие технологий ставило вопросы, ответом на которые стали научные подходы. К ним относится теория принятия решений, предпосылки возникновения которой обоснованы следующими факторами:

– увеличение «стоимости ошибки»: чем сложнее, значительнее и амбициознее план, тем меньше допустимы волевые решения, и тем больше потребность в научных методах для предварительного анализа последствий каждого решения;

– ускорение научно-технического прогресса: жизненный цикл технологических решений стал короче, «опыт» не успевает накапливаться, требуется применение математических методов в проектировании;

– появление и развитие компьютеров, что ускорило решение задач одновременно с необходимостью широкого использования аналитических методов [1, 2].

Коллективное решение может быть более эффективным, чем индивидуальное, поскольку оно позволяет использовать знания и опыт всех участников процесса оценки и обсуждения проекта. В процессе поиска коллективного решения можно учесть различные точки зрения и найти наиболее оптимальное решение, которое будет учитывать все аспекты ситуации.

Задача коллективного решения – это задача, в которой группа экспертов должна принять решение на основе индивидуальных предпочтений.

Одной из особенностей коллективного принятия решений является то, что мнения и предпочтения отдельных участников могут не совпадать. В таких случаях необходимо искать компромиссы или принимать решения, с которыми соглашается большинство участников коллектива.

Для постановки задачи коллективного решения на заданном множестве альтернатив необходимо определить следующие параметры:

- множество альтернатив $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;
- предпочтения каждого i -го участника $>$

$i, i = 1, \dots, m$;

– функцию полезности U , которая отображает предпочтения участников в числовую шкалу;

– численные значения k -го частного критерия j -й альтернативы $C_k^j, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, r$;

– r – количество частных критериев.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), представляет собой двухуровневую структуру, состоящую из рабочей группы экспертов (ГЛПР) и ответственного лица (ОЛПР), принимающего или не принимающего окончательное решение и отправляющего проект на доработку [3, 4];

Для принятия коллективных решений используют одну из представленных ниже моделей.

Комитет – это группа экспертов, которые собираются вместе для принятия решений по определенному вопросу или задаче. Члены комитета могут иметь разные мнения и приоритеты, но они должны работать вместе, чтобы достичь консенсуса по решению. Комитеты могут быть эффективными в ситуациях, когда для оценки вариантов решения требуется максимально широкий диапазон в различных областях знаний и при этом итоговое решение должно быть основано на консенсусе, когда за решение проголосовало определенная доля экспертов (половина коллектива экспертов плюс один эксперт или две трети экспертов, или другая утвержденная доля). В качестве зрительного образа модели комитета можно предложить круглый совещательный стол, за которым работают все эксперты.

Иерархия – это модель, в которой проект с вариантами решений продвигается по иерархической цепочке снизу вверх. Эксперты знакомятся с проектом последовательно. Проект отклоняется, как только его отклоняет эксперт в заданной цепочке иерархии. Таким образом, в централизованной иерархической модели коллективного принятия решения проект оценивается экспертом более высокого уровня иерархии только в том случае, если он одобрен экспертами на нижестоящих уровнях. Окончательный вариант решения принимается (утвер-

ждается) самым важным экспертом в уровне иерархии. В качестве зрительного образа модели иерархии можно предложить вертикальный конвейер-лифт, по которому решение продвигается к вышестоящему эксперту только если его пропустил эксперт нижнего уровня иерархии. В задаче выбора варианта трассы железнодорожной линии из n разработанных вариантов все эксперты должны проголосовать за один и тот же вариант трассы, только тогда он станет «победителем».

Полиархия – это модель, которая предполагает, что проект с вариантами решения направляется на рассмотрение случайно выбранному эксперту в коллективе, и принимается то решение, которое рекомендовал данный эксперт, или проект отклоняется (отправляется на доработку), если эксперт не одобрил ни один из вариантов решения. В полиархии случайно выбранный эксперт становится ЛПР от имени всей группы экспертов. В качестве зрительного образа такой модели можно представить сервисный центр, в окна приема документов которого сидят эксперты, единолично принимающие решения по поводу проекта, «поданного» в окно эксперту. Все эксперты равноценны по своей квалификации и равнозначны по своим полномочиям. В отличие от модели комитета (коллегиальной модели) и модели иерархии (модели последовательного рассмотрения проектов), модель полиархии является моделью параллельного рассмотрения проектов и значительно повышает производительность (пропускную способность) такой формы организации коллективного принятия решений.

Описанные модели коллективного принятия решений допускают комбинирование [5–7].

Для принятия решения по выбору оптимального варианта трассы железнодорожной линии наиболее приемлема модель комитета, так как при рассмотрении и обсуждении преимуществ и недостатков протрассированных вариантов необходимо личное общение экспертов, их взаимообогащение информацией, знакомство с точкой зрения каждого из экспертов, являющихся специалистами в своих областях знания, поскольку каждый из них при оценке и сравнении вариантов отстаивает общественно значимые приоритеты. Именно модель комитета и будет рассмотрена далее.

При коллективном выборе оптимального варианта трассы железнодорожной линии ре-

шение принимается с учетом различных обобщенных факторов, таких как экономические, экологические и социальные.

В процессе принятия решений участвуют различные специалисты, включая инвесторов, инженеров-проектировщиков, экологов, представителей муниципалитетов и общественных организаций и других экспертов. Оценка рисков и экономическая эффективность являются важными аспектами при выборе оптимального варианта.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения трех моделей принятия коллективных решений в рамках комитета (модели Кондорсе, модели Борда, линейной многокритериальной модели), которые, по мнению авторов, могут быть использованы для решения задачи по коллективному выбору оптимального варианта трассы железнодорожной линии.

Исследование выполнено по тестовой задаче изучения трех вариантов трассы новой железнодорожной линии, рассматриваемых коллективно.

В качестве экспертов рабочей ГЛПР и ОЛПР выступали авторы статьи, другие эксперты к решению задачи не привлекались.

Описание тестовой задачи

По топографической карте масштаба 1:50 000 проектной организацией «К» запроектированы три варианта трассы железнодорожной линии третьей категории с различными руководящими уклонами от станции А до направления Б. Топографическая карта с планами трех вариантов трассы представлена на рис. 1.

В строительстве железной дороги заинтересованы два инвестора.

Сначала был запроектирован вариант по Южному направлению с руководящим уклоном $i_p = 8\%$ – альтернатива x_1 , план трассы показан зеленым цветом, длина трассы составила 98 км.

Затем был запроектирован второй вариант трассы по Центральному направлению с $i_p = 10\%$ – альтернатива x_2 , план которой показан на карте бирюзовым цветом, длина трассы составила 93 км.

Наконец, для значительного сокращения длины железнодорожной линии был запроектирован третий вариант трассы по Северному направлению с $i_p = 12\%$ – альтернатива x_3 , план показан на карте фиолетовым цветом,

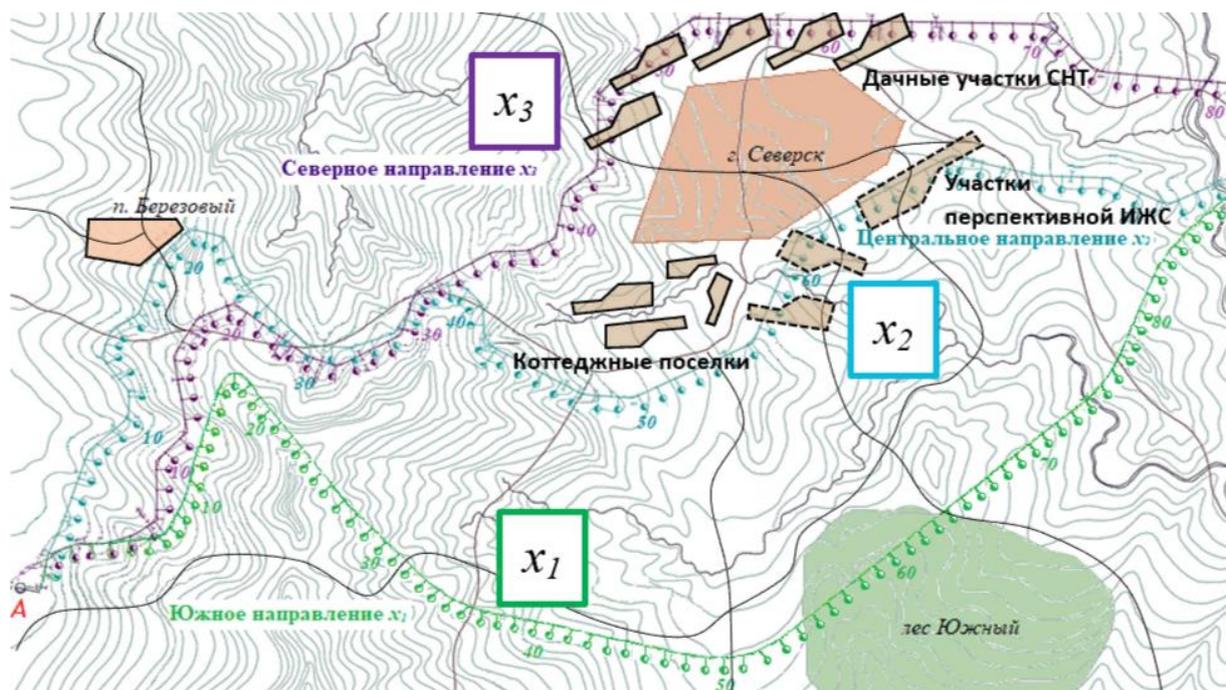


Рис. 1. Топографическая карта с планами трех вариантов трассы

Fig. 1. Topographic map with plans of three route options

длина трассы составила 85 км.

Вариантное проектирование железных дорог используется как на предпроектной стадии, так и в последующем на всех этапах проектирования [8, 9].

На начальных стадиях проектирования вполне вероятна ситуация, когда решение приходится принимать в условиях неопределенности и в нечеткой среде [10, 11].

Технико-экономическое сравнение вариантов трассы железнодорожной линии, как и скоростного рельсового транспорта, является задачей многокритериальной [12].

Многокритериальный подход позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант с уче-

том различных факторов, таких как чистый дисконтированный доход, приведенные строительно-эксплуатационные затраты, срок строительства, экологические, социальные факторы.

Все это позволяет принимать более обоснованные решения и учитывать различные интересы и требования заинтересованных сторон.

Технико-экономические показатели вариантов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что по приведенным затратам нет значительного преимущества какого-либо варианта, все варианты равноценны между собой по данному показателю в пределах точности расчетов. Поэтому для сравнения необходимо привлечь критерии, отражающие потенциальные

Таблица 1. Технико-экономические показатели вариантов

Table 1. Technical and economic indicators of options

Показатель Indicator	Альтернативы железнодорожных линий Railway track alternatives		
	1 вариант (x_1) 1 st option	2 вариант (x_2) 2 nd option	3 вариант (x_3) 3 ^d option
Направление Direction	Южное Southern	Центральное Central	Северное Northern
Руководящий уклон, ‰ Guiding bias, ‰	8	10	12
Длина трассы, км Route length, km	98	93	85
Приведенные затраты, млрд руб. Presented costs, billion rubles	10	9,9	9,8

выгоды инвесторов, улучшение транспортной инфраструктуры и влияние железной дороги на развитие региона, минимизацию воздействия на окружающую среду, влияние на население региона, так как строительство будет затрагивать важные общественные интересы.

Многокритериальная постановка задачи будет рассмотрена в третьей модели.

Для организации процесса принятия решений был сформирован комитет, состоящий из семи экспертов.

В табл. 2 перечислены должности, отражающие сферу интересов экспертов и обоснование их предпочтений, выразившихся в ранжировании альтернатив.

Таблица 2. Состав экспертной группы с обоснованием предпочтения каждого эксперта

Table 2. Expert group and rationale for each expert's preference

№ п/п	Эксперт Expert	Обоснование предпочтения Preference justification	Ранжирование альтернатив Ranking of alternatives
1	Инвестор 1 Investor 1	Для инвестора 1 предпочтителен вариант с наименьшими приведенными затратами For investor 1, the preferred option is the one with the lowest present costs	$x_3 > x_2 > x_1$
2	Инвестор 2 Investor 2	Инвестор 2 при ранжировании вариантов трассы отдавал предпочтение варианту с минимальными рисками. По его мнению, северное и центральное направления проходят вблизи г. Северск, в связи с чем есть риски затягивания согласования санитарно-защитной зоны вблизи города и в пригородных дачных районах, и районах, в которых планируется активное развитие индивидуального жилищного строительства. Инвестор 2 также опасается общественного резонанса и сложностей, связанных с необходимостью сноса неприватизированной существующей застройки на севере от г. Северска, попадающей в полосу отвода трассы по северному направлению. Поэтому инвестор 2 предпочел бы, чтобы трасса обходила город с глубоким обходом, на расстоянии 15–20 км от г. Северска по южному направлению Investor 2, when ranking route options, preferred the option with minimal risks. In his opinion, the northern and central directions pass near the city of Seversk, and therefore there is a risk of delaying the approval of the sanitary protection zone near the city and in suburban summer house areas, and areas in which the active development of individual housing construction is planned. Investor 2 is also afraid of public outcry and difficulties associated with the need to demolish an existing non-privatized building in the north of the city of Seversk, which falls within the right-of-way of the highway in the northern direction. Therefore, investor 2 would prefer that the route bypass the city with a deep bypass, at a distance of 15–20 km from the city of Seversk in a southern direction	$x_1 > x_2 > x_3$
3	Главный инженер проекта проектной организации «К» Chief project engineer of the design organization «K»	Главный инженер проекта выполнял ранжирование вариантов в пользу менее протяженной трассы The Chief project engineer ranked options in favor of a shorter route	$x_3 > x_2 > x_1$
4	Эксперт по вопросам	Для эколога самым непривлекательным вариантом	$x_2 > x_3 > x_1$

	экологии Ecology expert	является трасса по южному направлению, так как она проходит через лес Южный, который является важным объектов экосистемы района проектирования. По оценке эксперта, строительство дороги через Южный лес может привести к нарушению ареала обитания парнокопытных животных (косулей и кабанов). Центральное направление трассы предпочтительнее северного, так как преимущественное направление ветров в регионе – северное For an ecologist, the most unattractive option is the route in the southern direction, since it passes through the Yuzhny forest, which is an important object in the ecosystem of the design area. According to the expert, the construction of a road through the Southern Forest could lead to disruption of the habitat of artiodactyl animals (roe deer and wild boars). The central direction of the route is preferable to the north, since the predominant wind direction in the region is north	
5	Общественный представитель мэрии г. Северск Seversk mayor's office public representative	Эксперт проранжировал варианты данным образом исходя из того, чтобы железнодорожная линия не проходила вблизи участков перспективной индивидуальной жилой застройки, а также для эксперта важным является то, чтобы железная дорога прошла недалеко от города и появился Северский железнодорожный вокзал The expert ranked the options in this way based on the fact that the railway line does not pass near areas of promising individual residential development, and it is also important for the expert that the railway passes close to the city and the Seversk railway station appears	$x_3 > x_1 > x_2$
6	Глава местного самоуправления пос. Березовый Head of village Berezovyi local government	Эксперт заинтересован в том, чтобы трасса проходила вблизи пос. Березового (таким вариантом является x_2), так как по железной дороге возможна организация пригородного движения электропоездов, остановочная платформа электричек будет размещена напротив пос. Березовый The expert is interested in the route passing near the village Berezovyi (this option is x_2), since it is possible to organize suburban traffic of electric trains by rail; the stopping platform for electric trains will be located opposite the village Berezovyi	$x_2 > x_3 > x_1$
7	Отраслевой представитель ОАО «РЖД» Branch representative of JSC «Russian Railways»	Эксперт заинтересован в том, чтобы весовая норма поезда на построенной линии была наибольшей, поэтому ранжирование выполнено с учетом руководящего уклона – более предпочтителен вариант трассы с меньшим уклоном The expert is interested in ensuring that the weight standard of the train on the constructed line is the greatest, so the ranking is carried out taking into account the guideline slope - a route with a lower slope is more preferable	$x_1 > x_2 > x_3$

Предпочтения экспертов и ранжирование альтернатив в рассматриваемой задаче предложено авторами статьи.

Обоснование предпочтений экспертов при коллективном принятии решений важно по

нескольким причинам, которые сформулированы по результатам изучения работ [13, 14] и перечислены ниже:

1. Улучшение качества решения: обоснование предпочтений экспертов помогает опре-

делить, какие факторы и критерии наиболее важны для эксперта и влияют на его расстановку альтернатив по предпочтениям.

2. Повышение прозрачности процесса принятия решения: когда предпочтения экспертов обоснованы, это делает процесс принятия решения более объективным и понятным для всех участников, а также снижает вероятность возникновения разногласий и конфликтов, в результате чего возрастает доверие к результатам принятия решения.

3. Обеспечение легитимности и авторитетности экспертов: обоснование экспертных предпочтений помогает экспертам подтвердить их профессиональный опыт и знания, что делает их мнение более авторитетным и легитимным для других участников процесса.

4. Стимулирование активного участия экспертов в процессе принятия решений: если предпочтения эксперта обоснованы и признаны важными всеми членами экспертной группы, это стимулирует его активное участие в процессе принятия решения. Чем более эксперт вовлечен в процесс, тем более качественным и эффективным будет итоговое решение.

5. Создание основы для обучения и развития: обоснование экспертных предпочтений может служить основой для анализа и оценки различных подходов к принятию решений, а также для выявления областей, требующих улучшения.

Методы решений

Модель Кондорсе

Модель Кондорсе была разработана французским математиком Мари Антуаном Никола де Кондорсе в конце XVIII в. Он использовал ее для решения проблемы коллективного выбора, когда несколько альтернатив конкурируют за предпочтения группы людей. Модель основана на идее, что каждый человек имеет уникальное предпочтение, и цель состоит в том, чтобы найти решение, которое будет наилучшим для всех.

Это один из простейших и наиболее часто встречающихся на практике способов принятия коллективных решений. Он используется для определения победителя на выборах.

Для применения модели Кондорсе необходимо провести парные сравнения всех альтернатив и определить, какая из них является наиболее предпочтительной. Если ни одна из

альтернатив не является абсолютно предпочтительной, то выбор может быть сделан на основе других критериев, таких как количество голосов за каждую альтернативу.

Используем модель Кондорсе к рассматриваемой задаче.

На основании полученных от экспертов результатов ранжирования альтернатив, представленных в табл. 2, подсчитывается число экспертов $l(x_j, x_k)$, считающих альтернативу x_j более предпочтительной, чем x_k .

Если соблюдается условие:

$$l(x_j, x_k) > l(x_k, x_j), \quad (1)$$

то альтернатива x_j признается более предпочтительной, чем x_k .

Используем выражение (1) и определим предпочтительность альтернатив.

Поскольку $l(x_1, x_2) = 3 < l(x_2, x_1) = 4$ – три эксперта (под номерами 2, 5, 7) считают, что альтернатива x_1 предпочтительней x_2 , а четыре эксперта (1, 3, 4, 6) считают наоборот. Принимаем $x_2 > x_1$.

Поскольку $l(x_1, x_3) = 2 < l(x_3, x_1) = 5$ – два эксперта (под номерами 2, 7) считают, что альтернатива x_1 предпочтительней x_3 , а эксперты 1, 3, 4, 5, 6 считают наоборот, принимаем $x_3 > x_1$.

И, наконец, $l(x_2, x_3) = 4 < l(x_3, x_2) = 3$ – четыре эксперта (под номерами 2, 4, 6, 7) считают, что альтернатива x_2 предпочтительней x_3 , а эксперты 1, 3, 5 считают наоборот. Принимаем $x_2 > x_3$.

В результате парного сравнения коллективное ранжирование альтернатив имеет вид $x_2 > x_3 > x_1$, а наилучшей альтернативой является альтернатива x_2 – второй вариант трассы, запроектированный по центральному направлению с руководящим уклоном $i_p = 10\%$.

Основным недостатком данной модели является то, что в некоторых ситуациях при голосовании может возникнуть ситуация, когда три или более альтернатив не могут быть упорядочены с помощью голосования, даже если каждый голосующий имеет уникальное предпочтение.

Другими словами, если группа предпочитает вариант А варианту В, вариант В предпочитает варианту С, а вариант С предпочтительнее варианта А, то получается патовая ситуация, которую называют «парадокс Кондорсе», и выбор невозможно сделать.

Этот парадокс является результатом не-транзитивности групповых предпочтений, и ко-

гда мнения экспертов сильно различаются, вероятность возникновения парадокса Кондорсе увеличивается.

В такой ситуации следует использовать более сложные модели, например модель Борда [15].

Модель Борда

Модель Борда была разработана в XIX в. французским математиком Жан-Шарлем де Борда. Он использовал эту модель для определения результатов в спортивных соревнованиях, таких как гонки на яхтах и скачки. Позже модель стала широко использоваться в других сферах, включая спорт, образование, науку и многоэтапные выборы.

Преимуществом данной модели является то, что всегда существует наилучшая альтернатива, или несколько наилучших альтернатив, если они набирают одинаковое количество баллов. При этом, если решение по модели Кондорсе существует, то оно, как правило, совпадает с решением по модели Борда, или шире него, т.е. имеет кроме альтернативы, оптимальной по модели Кондорсе, еще несколько оптимальных альтернатив.

Для определения лучшей альтернативы по данной модели необходимо ввести функцию Борда $b(x_j)$ следующим образом:

$$b(x_i) = \sum_{i,k=1}^n [l(x_1, x_k) - l(x_k, x_j)],$$

где $l(x_j, x_k)$ – число экспертов, считающих альтернативу x_j более предпочтительной, чем x_k .

На практике чаще используют обобщенное правило Борда: за первое место при попарном сравнении альтернатив присуждается n баллов, за второе $n - 1$ и т.д. После этого подсчитывается сумма баллов для каждой альтернативы. Лучшей считается та альтернатива, которая набирает большую сумму баллов [16]:

$$b(x_i) = \sum_{i,N=1}^n [l_{x_i=N} \cdot n_N], \quad (2)$$

где $l_{x_i=N}$ – число экспертов, поставивших альтернативу x_i на N -е место при ранжировании; n_N – число баллов, начисляемых за N -е место при ранжировании.

Определим значение функции Борда по формуле (2) для рассматриваемой задачи.

За первое место при ранжировании альтернатив будет присуждаться 3 балла ($n_{N=1} = 3$), за второе место – 2 балла ($n_{N=2} = 2$), за третье место – 1 балл ($n_{N=3} = 1$). Произведем подсчет экспертов, проголосовавших за каждый вариант ранжирования альтернатив, в табл. 3.

Определим значения функции Борда:

Таблица 3. Результат ранжирования альтернатив
Table 3. Result of ranking the alternative

Вариант сравнения Comparison variant	Число экспертов, проголосовавших за данный вариант Number of experts voting for this option	Кто проголосовал Those voted	Предпочтение экспертов
1	2	Инвестор 2 Investor 2 Отраслевой представитель ОАО «РЖД» Branch representative of JSC «Russian Railways»	$x_1 > x_2 > x_3$
2	–	–	$x_1 > x_3 > x_2$
3	–	–	$x_2 > x_1 > x_3$
4	2	Эксперт по вопросам экологии Environmental expert Глава местного самоуправления пос. Березовый Head of local government of the village Berezovyi	$x_2 > x_3 > x_1$
5	1	Общественный представитель мэрии г. Северск Public representative of the mayor's office of Seversk	$x_3 > x_1 > x_2$
6	2	Инвестор 1 Investor 1 Главный инженер проекта проектной организации «К» Chief project engineer of the design organization «K»	$x_3 > x_2 > x_1$

$$b(x_1) = 2 \cdot 3 + 1 \cdot 2 + (2+2) \cdot 1 = 12 \text{ баллов,}$$

$$b(x_2) = 2 \cdot 3 + (2+2) \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 15 \text{ баллов,}$$

$$b(x_3) = (1+2) \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 1 = 15 \text{ баллов.}$$

Значит, по модели Борда две лучших альтернативы: x_2 – второй вариант трассы, запроектированный по центральному направлению с руководящим уклоном $i_p = 10\%$ и x_3 – третий вариант трассы, запроектированный по северному направлению с руководящим уклоном $i_p = 12\%$ и для окончательного выбора можно рекомендовать к использованию линейную многокритериальную модель группового принятия решений.

Линейная многокритериальная модель

Описанные выше модели Кондорсе и Борда не принимают во внимание многоаспектность (многокритериальность) сравнения при сопоставлении вариантов. Иными словами, в них не учитываются экспертные предпочтения в контексте каждой альтернативы, которая определяется совокупностью частных критериев эффективности. Одним из известных и распространенных методов многокритериального выбора является линейная многокритериальная модель.

Многокритериальность – это подход к принятию решений, который учитывает множество различных критериев или показателей при выборе наилучшего варианта.

Суть метода состоит в назначении коэффициентов для каждого критерия в линейной функции и ее последующей максимизации или минимизации, в зависимости от цели задачи. Важно привести все критерии к единой шкале для успешного использования линейной свертки, т.е. нормализовать частные критерии [17, 18].

Пусть количество допустимых альтернатив равно n , число экспертов – m . Количество частных критериев эффективности, характеризующих альтернативы по различным показателям, равно r .

Используем следующие обозначения: $\beta_k^i, j = 1 \dots m, k = 1 \dots r$, – оценка квалификации j -го

эксперта по k -му критерию; λ_j^i – предпочтения каждого j -го эксперта на множестве альтернатив $X = \{x_i\}, i = 1 \dots n$; v_k – значимость (важность) k -го частного критерия эффективности; C_k^i – численное значение k -го частного критерия для i -й альтернативы.

Будем считать, что наилучшее решение для некоторого k -го частного критерия достигается при его максимальном значении. Если же наилучшее решение достигается при его минимальном значении, то всегда от максимума можно перейти к минимуму путем расчета по формуле (3):

$$C_k^i = 1 - \frac{C_k^i}{\max(C_k^i)_{i,k}}. \quad (3)$$

Теперь для i -й альтернативы введем функцию предпочтительности $pr(x_i)$ следующим образом:

$$pr(x_i)_{i=1}^n = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \left(\sum_{k=1}^r \beta_k^j v_k \cdot C_k^i \right). \quad (4)$$

Произведем выбор наилучшего коллективного решения по многокритериальной линейной модели в предположении, что квалификация экспертов не связана с экономическим смыслом частных показателей качества альтернативы [15, 19].

Тогда расчет функции предпочтительности может быть выполнен по формуле (5):

$$pr(x_i)_{i=1}^n = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \left(\sum_{k=1}^r v_k \cdot C_k^i \right). \quad (5)$$

Используем линейную многокритериальную модель (4) в рассматриваемой задаче.

Для частных критериев эффективности заданы оценки значимости, приведенные в табл. 4.

Численно все значения показателей качества альтернатив и значимости частных критериев задаются в диапазоне от 0 до 1, от наихудшего (наименее значимого) до наилуч-

Таблица 4. Оценки значимости частных критериев эффективности
Table 4. Assessment of the significance of particular performance criteria

№ п/п	Критерий оценивания Evaluation criterion	Значимость критерия v_k Criterion significance v_k
1	Экономический аспект Economy aspect	0,50
2	Экологический аспект Environmental aspect	0,25
3	Социальный аспект Social aspect	0,25

шего (наиболее значимого).

В табл. 5 приведена оценка каждой альтернативы по выбранным критериям и выполнен расчет $\sum_{k=1}^r v_k \cdot C_k^i$.

В табл. 6 приведены предпочтения каждого эксперта на множестве альтернатив в виде значений λ_j^i , изменяющихся от 0 до 1 и дающих в сумме 1.

Таблица 5. Значения показателей качества C_k^i i -ой альтернативы по k -му частному

критерию эффективности и расчет значения $\sum_{k=1}^r v_k \cdot C_k^i$

Table. 5 The values of the quality indicators C_k^i of the i -th alternative according

to the k -th particular efficiency criterion and the calculation of the value of $\sum_{k=1}^r v_k \cdot C_k^i$

№ п/п	Наименование альтернативы Name of alternative	Экономический аспект $v_1 = 0,50$ Economic aspect $v_1 = 0,50$	Экологический аспект $v_2 = 0,25$ Environmental aspect $v_2 = 0,25$	Социальный аспект $v_3 = 0,25$ Social aspect $v_3 = 0,25$	$S^i = \sum_{k=1}^r v_k \cdot C_k^i$
x_1	Южное направление Southern direction	0,00	0,19	0,34	0,13
x_2	Центральное направление Central direction	0,01	0,53	0,65	0,30
x_3	Северное направление Northern direction	0,02	0,47	0,75	0,31

Таблица 6. Результат расчета лучшей альтернативы по линейной многокритериальной модели

Table 6. Result of calculating the best alternative using a linear multicriteria model

№ п/п	Эксперт Expert	Альтернативы Alternatives						Предпочтения Preferences
		x_1		x_2		x_3		
		λ_j^1	$\lambda_j^1 S^1$	λ_j^2	$\lambda_j^2 S^2$	λ_j^3	$\lambda_j^3 S^3$	
1	Инвестор 1 Investor 1	0,05	0,007	0,25	0,075	0,70	0,217	$x_3 > x_2 > x_1$
2	Инвестор 2 Investor 2	0,70	0,091	0,20	0,060	0,10	0,031	$x_1 > x_2 > x_3$
3	Главный инженер проекта проектной организации «К» Chief project engineer of the design organization «K»	0,20	0,026	0,35	0,105	0,45	0,140	$x_3 > x_2 > x_1$
4	Эксперт по вопросам экологии Environment expert	0,00	0,000	0,55	0,165	0,45	0,140	$x_2 > x_3 > x_1$
5	Общественный представитель мэрии г. Северск Public representative of the mayor's office of Seversk	0,50	0,065	0,00	0,000	0,50	0,155	$x_3 > x_1 > x_2$
6	Глава местного самоуправления пос. Березовый Head of local government of the village Berezovyi	0,03	0,004	0,90	0,270	0,07	0,022	$x_2 > x_3 > x_1$
7	Отраслевой представитель ОАО «РЖД» Branch representative of JSC «Russian Railways»	0,75	0,098	0,15	0,045	0,10	0,031	$x_1 > x_2 > x_3$
	Значения функции предпочтительности по многокритериальной линейной модели $pr(x_i)_{i=1}^n$ Values of the preference function according to the multicriteria linear model	–	0,291	–	0,720	–	0,736	–

После суммирования значений $\lambda_j^i \cdot S^i$ в каждом из трех столбцов в конечной строке таблицы приведено итоговое значение функции предпочтительности по многокритериальной линейной модели для сравниваемых альтернатив – вариантов трассы железнодорожной линии $pr(x_i)_{i=1}^n$.

Обсуждение результатов

По результатам расчета по линейной многокритериальной модели лучшим коллективным решением является альтернатива x_3 , так как $pr(x_3) = 0,736 = \max$, что уточняет решение по модели Борда.

Принятие решений при многих критериях позволило явно учитывать несколько различных критериев, отражающих экономический, экологический и социальный аспекты строительства новой железнодорожной линии по одному из трех запроектированных вариантов трассы.

Для анализа полученного результата при коллективном принятии решения важно видеть обоснование предпочтений каждого эксперта.

Следует отметить, что при коллективных решениях существует опасность манипулиро-

вания результатами оценок, из-за чего могут произойти ошибки в процессе формирования коллегиального решения [20].

Заключение

Коллективное принятие решений является важным процессом при выборе оптимального варианта трассы железнодорожной линии. Оно позволяет учесть мнение всех заинтересованных сторон и найти наиболее приемлемый вариант для всех экспертов.

Модель Кондорсе относительно проста для понимания и применения, что делает ее привлекательной при коллективном выборе. Однако при использовании этой модели возникает ситуация, когда коллективное решение не может быть принято из-за ситуации нетранзитивности предпочтений на множестве альтернатив. В этом случае следует использовать модель Борда с использованием обобщенного правила обобщенное правило Борда.

В задачах, где важен многокритериальный подход, применяют линейную многокритериальную модель, позволяющую оценить множество критериев одновременно с учетом их веса. Какую модель выбрать, зависит от конкретной ситуации и целей.

Список литературы

1. Завалищин Д.С., Гончарь П.С., Тимофеева Г.А. Теория принятия решения. Екатеринбург : УрГУПС, 2019. 84 с.
2. Ростовцев В.С. Теория принятия решений. Киров : ВятГУ, 2021. 192 с.
3. Колбин В.В. Математические методы коллективного принятия решений. СПб. : Лань, 2022. 256 с.
4. Быков И.Г., Кириллов М.И. Определение процесса коллективного принятия решения в комплексной системе поддержки принятия решений (КСППР) // Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества. 2004. № 1. С. 186–187.
5. Санников А.А., Куцубина Н.В. Системный анализ при принятии решений. Екатеринбург : УГЛТУ, 2015. 137 с.
6. Веприкова М.Я. Коллективные методы принятия решений в современных организациях, их эффективность // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8. № 9А. С. 353–360.
7. Sah R.K., Stiglitz J.E. Committees, hierarchies and polyarchies // The Economic Journal. 1988. Vol. 98. № 391. P. 451–470.
8. Предпроектные соображения по строительству железнодорожного пути по направлению «Окино-Ключевское месторождение угля – Гусиноозерская ГРЭС» / И.В. Благоразумов, К.А. Кирпичников, Е.В. Непомнящих и др. // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 39–42.
9. Казарина В.В., Подвербный В.А. Принятие решения по выбору варианта трассы железнодорожной линии // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 3 (82). С. 140–151.
10. Андрейчиков А.В. Методы и интеллектуальные системы анализа и синтеза новых технических решений. М. : РИОР, 2019. 544 с.
11. Подвербный В.А. Выбор варианта железной дороги на основе критерия нечеткой полезности // Транспортное строительство. 2000. № 7. С. 10–13.
12. Скоростной рельсовый транспорт для обеспечения пассажирских перевозок в Иркутской агломерации / В.А. Подвербный, О.В. Подвербная, А.В. Подвербный и др. // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2007. Т. 2. С. 85–105.
13. Карелин В.П. Моделирование коллективного интеллекта в системах управления и поддержки принятия решений // Актуальные проблемы современной экономики. Математические методы, модели и информационные технологии : сб. докл. XVIII науч.-практ. конф. преподавателей, студентов, аспирантов и молодых ученых. Таганрог, 2017. С. 129–135.
14. Тюшняков В.Н., Челашов Д.А. Исследование парадокса циклического голосования при принятии коллективных решений // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7-3. С. 91–92.

15. Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Экспертные системы поддержки принятия коллективных решений. Пермь : ПНИПУ, 2017. 38 с.
16. Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.
17. Ганичева А.В., Ганичев А.В. Моделирование коллективного принятия решений // Научный журнал КубГАУ : политемат. сетевой электрон. науч. журн. 2021. № 174 (10). URL: <http://ej.kubagro.ru/2021/10/pdf/07.pdf>. (Дата обращения 18.03.2023).
18. Борисов В.И. Метод свертки критериев для решения задачи многокритериальной оптимизации // Проблемы и тенденции научных исследований в системе образования : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Тюмень, 2019. Ч. 1. С. 25–26.
19. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Модели принятия коллективных решений в производственных системах // Управление большими системами. 2015. № 58. С. 161–178.
20. Gibbard A. Manipulation of Voting Schemes: A General Result // *The Econometrica*. 1973. Vol. 41. Iss. 4. P. 587–601.

References

1. Zavalishchin D.S., Gonchar' P.S., Timofeeva G.A. *Teoriya prinyatiya resheniya* [Decision theory]. Ekaterinburg: URGUPS Publ., 2019. 84 p.
2. Rostovtsev V.S. *Teoriya prinyatiya reshenii* [Decision Theory]. Kirov: VyatGU Publ., 2021. 192 p.
3. Kolbin V.V. *Matematicheskie metody kolektivnogo prinyatiya reshenii* [Mathematical methods of collective decision-making]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2022. 256 p.
4. Bykov I.G., Kirillov M.I. *Opreделение protsessa kolektivnogo prinyatiya resheniya v kompleksnoi sisteme podderzhki prinyatiya reshenii (KSPPR)* [Definition of the process of collective decision-making in the integrated decision support system (IDSS)]. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva* [Problems of quality, safety and diagnostics in the information society], 2004, no. 1, pp. 186–187.
5. Sannikov A.A., Kutsubina N.V. *Sistemnyi analiz pri prinyatii reshenii* [System analysis in decision-making]. Ekaterinburg: UGLTU Publ., 2015. 137 p.
6. Veprikova M.Ya. *Kollektivnye metody prinyatiya reshenii v sovremennykh organizatsiyakh, ikh effektivnost'* [Collective decision-making methods in modern organizations, their effectiveness]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: yesterday, today, tomorrow], 2018, vol. 8, no. 9A (82), pp. 353–360.
7. Sah R.K., Stiglitz J.E. Committees, hierarchies and polyarchies. *The Economic Journal*, 1988, vol. 98, no. 391, pp. 451–470.
8. Blagorazumov I.V., Kirpichnikov K.A., Nepomnyashchikh E.V., Klochkov Ya.V., Podverbnyi V.A., Podverbnyaya O.V. *Predproektnye soobrazheniya po stroitel'stvu zhelezнодорожного пути по направлению «Окино-Клычевское месторождение угля – Гусиноозерская ГРЭС»* [Pre-design considerations for the construction of a railway track in the direction «Okino-Klyuchevskoye coal deposit – Gusinozerskaya State District Power Plant»]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of a regional railway network], 2013, no. 1, pp. 39–42.
9. Kazarina V.V., Podverbnyi V.A. *Prinyatie resheniya po vyboru varianta trassy zhelezнодорожной линии* [Decision-making on the choice of the route of the railway line]. *Mir transporta* [World of Transport], 2019, vol. 17, no. 3 (82), pp. 140–151.
10. Andreichikov A.V. *Metody i intellektual'nye sistemy analiza i sinteza novykh tekhnicheskikh reshenii* [Methods and intelligent systems for analysis and synthesis of new technical solutions]. Moscow: RIOR Publ., 2019. 544 p.
11. Podverbnyi V.A. *Vybor varianta zhelezной дороги на основе критерия нечеткой полезности* [Choosing a railway option based on the criterion of fuzzy utility]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2000, no. 7, pp. 10–13.
12. Podverbnyi V.A., Podverbnyaya O.V., Podverbnyy A.V., Belyaev D.B., Malykh A.A. *Skorostnoi rel'sovyi transport dlya obespecheniya passazhirskikh perevozok v Irkutskoi aglomeratsii* [High-speed rail transport for passenger transportation in the Irkutsk agglomeration]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy izyskaniya, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii Rossiiskikh zheleznykh dorog»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Problems and prospects of survey works, design, construction and operation of Russian railways»]. Irkutsk, 2007, vol. 2, pp. 85–105.
13. Karelin V.P. *Modelirovanie kolektivnogo intellekta v sistemakh upravleniya i podderzhki prinyatiya reshenii* [Modeling of collective intelligence in management systems and decision support]. *Sbornik dokladov XVIII nauchno-prakticheskoi konferentsii prepodavatelei, studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy sovremennoi ekonomiki. Matematicheskie metody, modeli i informatsionnye tekhnologii»* [Proceedings of the XVIII scientific and practical conference of researches, students, postgraduates and young scientists «Actual problems of modern economics. Mathematical methods, models and information technologies»]. Taganrog, 2017, pp. 129–135.
14. Tyushnyakov V.N., Chelashov D.A. *Issledovanie paradoksa tsiklicheskogo golosovaniya pri prinyatii kolektivnykh reshenii* [Investigation of the paradox of cyclic voting in collective decision-making]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2014, no. 7-3, pp. 91–92.
15. Gitman M.B., Stolbov V.Yu. *Ekspertnye sistemy podderzhki prinyatiya kolektivnykh reshenii* [Ex-pert systems to support collective decision-making]. Perm': PNIPU Publ., 2017. 38 p.
16. Nogin V.D. *Lineinaya svertka kriteriev v mnogokriterial'noi optimizatsii* [Linear convolution of criteria in multi-criteria optimization]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial intelligence and decision-making], 2014, no. 4, pp. 73–82.
17. Ganicheva A.V., Ganichev A.V. *Modelirovanie kolektivnogo prinyatiya reshenii* [Modeling of collective decision-making]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2021, no. 174, pp. 64–69.

18. Borisov V.I. Metod svertki kriteriev dlya resheniya zadachi mnogokriterial'noi optimizatsii [The method of criteria convolution for solving the problem of multi-criteria optimization]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i tendentsii nauchnykh issledovaniy v sisteme obrazovaniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Problems and trends of scientific research in the education system»]. Tyumen', 2019, part 1, pp. 25–26.

19. Vozhakov A.V., Gitman M.B., Stolbov V.Yu. Modeli prinyatiya kollektivnykh reshenii v proizvodstvennykh sistemakh [Models of collective decision-making in production systems]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of large systems], 2015, no. 58, pp. 161–178.

20. Gibbard A. Manipulation of Voting Schemes: A General Result. *The Econometrica*, 1973, vol. 41, iss. 4, pp. 587–601.

Информация об авторах

Феоктистова Маргарита Владимировна, аспирант кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bambuk09990@gmail.com.

Подвербный Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vpodverbniy@mail.ru.

Information about the authors

Margarita V. Feoktistova, Ph.D. Student of the Department of Construction of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bambuk09990@gmail.com.

Vyacheslav A. Podverbnyi, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Construction of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vpodverbniy@mail.ru.