

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Гибридный подход к моделированию факторов производительности труда: синтез рандомизированных контролируемых экспериментов и причинных байесовских сетей

© 2024 г. Е.В. Орлова

Е.В. Орлова,

Уфимский университет науки и технологий, Уфа; e-mail: ekorl@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2023

Аннотация. Решение задачи эффективного управления производительностью труда работников компаний с учетом множества разнородных факторов, которые имеют стохастический, нестационарный и нелинейный характер и встраиваются в сложные цепочки причинно-следственных взаимодействий в условиях цифровой трансформации экономики, представляет определенные трудности. В работе предложена технология, которая обеспечивает с высокой степенью достоверности установление причинно-следственной связи между реализацией альтернативных управленческих решений и производительностью труда работников компании. Эта технология предназначена для выбора решений на основе оценки их воздействия на производительность труда. Новизна предлагаемой технологии состоит в том, что она основана на гибридном подходе к моделированию объекта исследования и объединяет две модели. Первая модель — структурная — построена на основе априорных знаний законов функционирования и развития и обеспечивает причинное понимание объекта и способна предсказать эффект воздействий факторов (явных и косвенных). Вторая модель основана на данных и настраивается (адаптируется) с учетом эмпирических данных, полученных в результате наблюдения (измерения) за объектом. Разработанная технология использует разнородные методы исследования — метод рандомизированного контролируемого эксперимента для получения информации о тестируемых мероприятиях, методы статистического анализа данных (дескриптивного анализа данных, корреляционного и регрессионного анализов, разность разностей для установления причинной связи между реализуемым мероприятием и ростом производительности труда), байесовскую сеть причинности для построения и анализа структурной модели объекта и объяснения причинных связей явных и скрытых факторов, влияющих на производительность труда в условиях реализации мероприятий. Практическую значимость имеют результаты апробации предлагаемых теоретических положений, методов и технологии на фактических данных о деятельности предприятий сферы питания. Полученные нами результаты опираются на эффективное использование разработанной технологии, направленной на рост производительности труда в условиях неопределенности внешней и внутренней среды и устойчивое развитие предприятий и повышение их доходности.

Ключевые слова: производительность труда работников предприятия, рандомизированные контролируемые эксперименты, причинная байесовская сеть, причинные связи, гибридный подход.

Классификация JEL: C32, C53, C61, O15.

УДК: 330.4, 519.865.7

Для цитирования: **Орлова Е.В.** (2024). Гибридный подход к моделированию факторов производительности труда: синтез рандомизированных контролируемых экспериментов и причинных байесовских сетей // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 1. С. 108–120. DOI: 10.31857/S0424738824010099

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение причинных зависимостей в экономических, социальных системах сопряжено со значительными трудностями. Они состоят в том, что вместе с рассматриваемым объектом (системой) необходимо учитывать большое число факторов, действующих на исследуемые характеристики объекта, про существование которых либо ничего неизвестно, либо их невозможно или трудно измерить. В таком случае требуются результаты наблюдений (данные) и понимание содержательных (сущностных) основ исследуемого объекта.

Особенностями данных, описывающих экономические и социальные процессы, являются: разнообразие шкал измерения признаков, неоднородность выборок и отклонение распределений

признаков от нормального закона, неполнота и пропуски в данных, стохастичность, мультиколлинеарность и гетероскедастичность данных. Эти свойства ограничивают сферу применения классических методов статистического моделирования, аппроксимации и прогнозирования и требуют нового методологического подхода к моделированию причинных связей и решению задачи прогнозирования методами, не чувствительными к этим особенностям и пригодными для использования в различных приложениях экономики.

Повышение производительности труда и модернизация приоритетных несырьевых отраслей экономики в настоящее время являются не только необходимыми условиями экономического роста, но и важными составляющими национальной безопасности России. Производительность труда — ключевой показатель экономического развития страны и уровня жизни населения.

Производительность труда как экономическая характеристика эффективности труда и результативности производственно-экономической деятельности показывает величину затрат труда, необходимую для производства единицы продукции. Традиционно факторы роста производительности труда объединяются в следующие группы: материально-технические (уровень инновационности техники и технологий, создание высокопроизводительных рабочих мест); организационно-экономические (уровень развития специализации и концентрации производства, техники бережливого производства, совершенствование структуры и объемов производства, повышение квалификации) и социально-экономические (уровень оплаты труда и условия труда).

В период цифровой трансформации экономики условия технологического развития неизбежно изменяют характер и условия труда. Меняется отношение к характеру труда: под воздействием цифровизации бизнес-процессов происходит трансформация задач работников. Это способствует появлению новых и изменяющихся профессий, приводит к исчезновению профессий-пенсионеров, но при этом провоцирует рост безработицы. Поэтому проблема, связанная с повышением качества труда как важнейшего производительного ресурса предприятия, является актуальной, социально и экономически значимой.

Человеческий капитал как интенсивный производительный фактор развития экономики, общества и семьи включает часть трудовых ресурсов, знания и интеллект, инструменты труда человека, среду обитания и трудовой деятельности. В человеческий капитал предприятий входит организационный (структурный) капитал (Youndt, 2000; Armstrong, 2008), социальный и потребительский капитал как компонент интеллектуального капитала в форме навыков и накопленных знаний (Edvinsson, 2007; Samad, 2020; Gratton, Ghoshal, 2003) для создания добавленной стоимости.

Социальный капитал как структурный компонент человеческого капитала влияет на способность человека в процессе его трудовой деятельности формировать инновационные решения, что является чрезвычайно важным в условиях ESG-ориентированного бизнеса. Функционал социального капитала состоит в том, чтобы сформировать определенную ценность аспектов социальной структуры (эмоций, моральных ограничений, социальных обязательств и ожиданий, доверия) и перевести ее в ресурс, который можно использовать для достижения цели индивида или организации.

В работах (Орлова, 2022б; Orlova, 2022a) предложена методология оценки социального капитала работников и компании в целом с учетом следующих факторов: межличностного и институционального доверия, трудовых ценностей и вовлеченности в социальные сети. Методология базируется на модели, основанной на данных, представляющих объективные сведения о работниках, и субъективной информации, полученной из анкетирования работников. Она позволяет проводить сравнительный анализ работников с позиции социального капитала. Там же приведено эмпирическое подтверждение влияния социального капитала и его факторов на индивидуальную инновационность работника; дано сущностное (экономическое) объяснение и интерпретация этого влияния.

Целью данной работы является разработка и апробация технологии, обеспечивающей с высокой степенью достоверности установление причинно-следственной связи между реализацией альтернативных управленческих решений (направленных по повышению производительности труда) и производительностью труда работников предприятия. Технология предназначена для выбора решений на основе оценки эффекта воздействия управленческих решений на производительность труда.

2. МЕТОДЫ

2.1. Обзор подходов к моделированию причинности

Причинность (causality) характеризует такое влияние одного события (причины) на другое событие (следствие), посредством которого событие-следствие возникает и без события-причины оно бы не возникло. Понятия причины и следствия формируются на стыке принципов всеобщей связи и развития. С позиции принципа всеобщей связи причинность определяется как один из основных видов связи, в которой причина при определенных условиях порождает следствие. С позиции принципа развития причинность определяется как всякое изменение и развитие, т.е. изменение в сторону появления нового качества.

Причинный вывод (causal inference) представляет собой процесс установления фактического процесса-следствия в результате наблюдения за процессом-причиной и его изменением, которое породило изменение процесса-следствия. Не всякая связь является причинной. Наличие установленных корреляций между факторами, характеризующими систему и/или ее внешнюю среду, еще не гарантирует наличия причинно-следственных связей между этими факторами.

Построить причинную модель можно двумя способами:

1) аналитически — исходя из экспертного знания физических (технических, экономических, социальных и др.) законов, обуславливающих функционирование моделируемой системы. К этому способу можно отнести построение систем дифференциальных уравнений, когнитивное моделирование (Bryson et al., 2004; Орлова, 2022б), моделирование на основе методов исследования операций, имитационное моделирование (Бахтизин, 2008);

2) экспериментально — на основе эмпирических данных, являющихся результатом наблюдения или измерения (эксперимента) и подбора аппроксимирующих зависимостей. Сюда относятся: статистическое моделирование, моделирование на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения, интеллектуального анализа данных на основе нейронных сетей, графовые модели (моделирование структурными уравнениями), моделирование на базе ориентированного ациклического графа — байесовские сети (Pearl, 2009, 2021).

Статистические модели позволяют делать прогнозы одной переменной в зависимости от изменения других в заданных условиях эксперимента. Такая модель не предсказывает, каким будет эффект от воздействия факторов (возмущений), но может извлекать знания из наблюдений, выявлять в них закономерности. Ограничением этой группы методов являются жесткие требования к характеристикам данных — они должны быть независимыми и одинаково распределенными (i.i.d — independent and identically distributed). Статистические модели не обладают прогностическими способностями в условиях изменения условий экспериментов или воздействий других, не учтенных в модели факторов.

Хорошо интерпретируемую статистическую модель с высоким уровнем адекватности не представляется возможным использовать для доказательства причинной связи между характеристиками объекта. Это связано с тем, что установление корреляции не означает наличия причинности. Поэтому причинно-следственные связи не могут быть обоснованы только на основе статистического подхода, но требуют применения теоретических знаний о причинах и следствиях в предметной области и аналитических (структурных, причинных) моделей.

Такой симбиоз на основе данных и физических моделей позволяет повысить прозрачность моделей, обеспечить их объяснимость, усилить обобщающую и прогностическую способность. Гибридная модель причинности должна быть представлена в виде модульной архитектуры, в которой различные модули можно индивидуально настраивать и адаптировать для решения новых задач. Такой подход позволит использовать знания и опыт экспертов в заданной предметной области и результаты эмпирических выводов. Как и аналитические (физические), гибридная модель обеспечивает причинное понимание объекта и способна предсказать эффект воздействия факторов.

2.2. Методология исследования

Рассматривается задача управления производительностью труда работников предприятия на основе использования одного из набора альтернативных управленческих решений. Эти решения состоят в проведении мероприятий, направленных на рост производительности труда. Был разработан комплекс, состоящий из трех видов мероприятий, эффективность которых оценивается на основе экспериментов: 1) переход на частично дистанционный режим работы; 2) введение рейтинга сотрудников и подразделений для дополнительного премирования; 3) стажировка в ведущих компаниях.

Критерием эффективности конкурирующих мероприятия является полное и устойчивое достижение конечных целей системы управления при минимальных затратах его реализации. Для этого необходимо протестировать набор мероприятий с позиции воздействия на производительность труда, а затем ранжировать их в зависимости от степени воздействия на показатель производительности труда.

Тестируемая гипотеза: применение мероприятия (каждого из трех в отдельности) влияет на производительность труда (установление причинно-следственной связи между реализацией мероприятия и ростом производительности труда) в условиях действия явных и скрытых факторов на эффективность трудовой деятельности работников предприятия.

Методологической основой исследования является разработка концепции и технологии моделирования и управления, предназначенных для оценки влияния мероприятий на рост производительности труда и используемых для принятия аргументированных решений в области кадровой политики предприятия, направленной на снижение рисков человеческого капитала.

Рассмотрим этот процесс по этапам.

Этап 1. На подготовительном этапе технологии формируется репрезентативная выборка работников для проведения испытаний по каждому мероприятию. Выборка осуществляется случайным образом из разных подразделений предприятия. Перед испытаниями все кандидаты проходят инструктаж и со всех кандидатов собирается добровольное согласие участвовать в экспериментальных исследованиях.

Этап 2. Проводятся рандомизированные контролируемые эксперименты и распределение участников в экспериментальную (тестовую) и контрольную группы. Рандомизация призвана так разделить работников на группы, чтобы заранее невозможно было предсказать, в какую группу попадет испытуемый. Здесь важнейшим этапом является использование метода маскирования на основе двойного слепого исследования результатов экспериментов. Это означает, что информация об участниках испытаний и принадлежности их к какой-то группе является закрытой для участников и исследователей. Полная информация есть только у лица, ответственного за проведение испытаний. Метод двойного слепого обследования предотвращает систематические ошибки, которые могут повлиять на результаты эксперимента. В каждой из трех экспериментальных групп реализуется одно из трех мероприятий, а в контрольной группе никаких вмешательств не производится. Наблюдение осуществляется над экспериментальной и контрольной группами в течение восьми месяцев.

Этап 3. Обрабатываются результаты рандомизированных контролируемых экспериментов. Обработка осуществляется на основе методов статистического анализа (дескриптивный, корреляционно-регрессионный анализ; метод оценки показателей динамики исследуемых характеристик и разности разностей). Оценивается частный эффект действия мероприятий на производительность труда, т.е. эффект бинарного воздействия мероприятия в условиях допущения, что различие между экспериментальной и контрольной группами объясняется исключительно воздействием самого мероприятия. При этом влияние других переменных нивелировано (в данном случае — с помощью рандомизации). Тогда сравнение результатов двух групп могут быть интерпретированы с точки зрения наличия причинно-следственной связи между воздействием (мероприятием) и управляемым показателем — производительностью труда.

Этап 4. Оценивается эффективность мероприятий и формируется заключение о наилучшем управленческом решении. Оценка полного эффекта действия делается на основе причинной байесовской сети.

Представленная здесь технология способна обеспечить с высокой степенью достоверности установление причинно-следственной связи между реализацией альтернативных управленческих решений и производительностью труда. Она предназначена для выбора решений на основе оценки эффекта их воздействия на производительность труда.

Новизна предлагаемой технологии состоит в том, что гибрид двух моделей объединяет две модели: 1) структурной (построенной на основе априорных знаний законов функционирования; 2) настраиваемой (адаптированной), основанной на эмпирических данных.

Такая технология обладает высоким уровнем адекватности за счет применения разнородных методов анализа объекта, соответствующих сложности решаемых задач. К таким методом относятся: а) метод рандомизированного контролируемого эксперимента для получения информации о тестируемых мероприятиях; б) методы статистического анализа данных (метод дескриптивного анализа, метод корреляционного и регрессионного анализа, метод разность разностей для установления причинной связи между реализуемым мероприятием и ростом производительности труда); в) теория и методы байесовских сетей причинности для построения и анализа структурной модели

объекта и объяснения причинных связей явных и скрытых факторов, влияющих на производительность труда в условиях реализации выбранных мероприятий.

Разработанная технология обеспечивает системную интеграцию теории причинных байесовских сетей, методов статистических рандомизированных испытаний и разности разностей. Она позволяет в условиях нелинейности, динамичности, стохастичности и нестационарности исходных данных оценивать результаты действия управленческих решений и выбирать наиболее эффективные. Отличие предлагаемой технологии от других состоит в том, что она позволяет определить синергетический эффект действия причины (мероприятия) на следствие (производительность труда) при наличии скрытых факторов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Оценка частного эффекта воздействия мероприятий. Результаты применения метода разность разностей

Рассмотрим дизайн эксперимента для реализации *первого этапа технологии*. Исследуется выборка из 120 работников предприятия сферы общественного питания, дифференцированных по внедрению / отказу от мероприятий, направленных на увеличение производительности труда. В каждом мероприятии занято 40 человек: 20 в тестовой группе и 20 — в контрольной. Разделение на подгруппы осуществлялось методом случайного отбора (рандомизации). Эксперимент длится восемь месяцев; первые четыре месяца воздействие на тестовую группу не осуществляется, затем, в оставшееся время, мероприятия проводились только в тестовой группе. Наблюдаются характеристики индивидуальной производительности труда работников до начала и во время мероприятий. На основе методики, описанной в (Orlova, 2021a), по результатам анкетирования оценивается социальный капитал, уровень мотивации и инновационность работников.

Ставится задача оценить влияние применения каждого мероприятия на производительность труда и проверить гипотезу о наличии причинно-следственной связи между мероприятиями и ростом производительности труда.

Так как выборки работников до и после проведения экспериментов имеют одинаковый состав, они могут быть зависимыми.

Протестируем гипотезу о статистически значимом различии (на уровне значимости $\alpha = 0,05$) в средних темпах роста производительности труда до и после реализации мероприятий для тестовой и контрольной выборок. Для этого используем парный t-критерий Стьюдента для двух зависимых выборок.

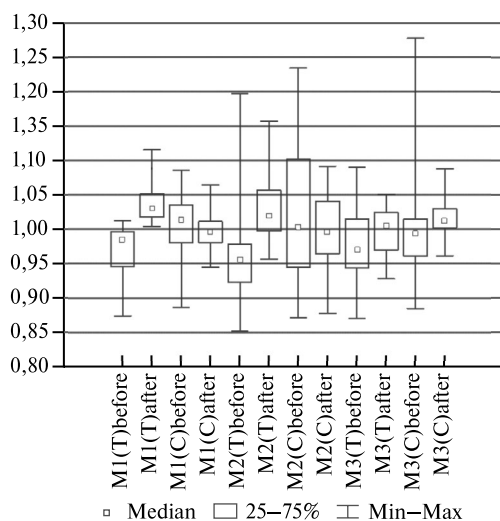


Рис. 1. Диаграммы размаха темпов роста производительности труда в выборках работников

Примечание. Обозначения на рисунке: M1(T)before, M1(T)after — темпы роста производительности труда работников, входящих в тестовую выборку при реализации мероприятия 1; M1(C)before, M1(C)after — темпы роста производительности труда работников, входящих в контрольную выборку при реализации мероприятия 1, и т.д.

Результаты показали значимое различие между темпами роста производительности труда (следовательно, и выборками работников) только в тестовых группах для мероприятий 1 и 2. Остальные выборки работников с точки зрения исследуемой характеристики отличаются незначительно. Это может быть связано с тем, что проверяемые выборки не распределены нормально. Если исследуемые выборки не подчиняются нормальному закону распределения, то для проверки гипотезы о различии средних значений исследуемой характеристики в группах можно использовать непараметрические тесты.

Непараметрическим аналогом парного t-критерия Стьюдента для зависимых выборок является тест Вилкоксона, основанный на парных сравнениях значений исследуемой характеристики до и после проведения мероприятий и их ранжирования. Результаты теста Вилкоксона показали значимое различие (на уровне значимости $\alpha = 0,05$) в темпах роста производительности труда для тестовых групп работников при реализации мероприятий 1 и 2, а также для контрольной группы — при реализации мероприятия 3. Анализ выявленных различий продемонстрирован на диаграмме размаха (рис. 1). Из диаграммы видно, что

Таблица 1. Расчетная таблица для метода разности разностей для мероприятий 1–3

Переменная	Значение переменной у работников, реализующих мероприятие		Разность значений
	Тестовая группа	Контрольная группа	
Мероприятие 1. Переход на частичный дистанционный режим работы			
Темп роста производительности труда до внедрения мероприятия	0,9686	1,0013	−0,0327
Темп роста производительности труда после внедрения мероприятия	1,0373	0,9965	0,0408
Изменение темпов роста производительности труда	0,0687	−0,0048	0,0735
Мероприятие 2. Введение рейтингования сотрудников, подразделений и премирования			
Темп роста производительности труда до внедрения мероприятия	0,9654	1,0254	−0,06
Темп роста производительности труда после внедрения мероприятия	1,0317	0,995	0,0367
Изменение темпов роста производительности труда	0,0663	−0,0304	0,0967
Мероприятие 3. Стажировки в ведущих компаниях			
Темп роста производительности труда до внедрения мероприятия	0,9748	0,9891	−0,0143
Темп роста производительности труда после внедрения мероприятия	0,9959	1,0177	−0,0218
Изменение темпов роста производительности труда	0,0211	0,0286	−0,0075

для тестовой группы при реализации мероприятия 1 изменение темпа роста производительности труда (по медианному значению) составило 5%; по мероприятию 2 для тестовой группы работников этот прирост оказался ниже и составил 3%, а для контрольной группы при реализации мероприятия 3 эта разница была чуть менее 2%. Различия в изменении производительности труда для остальных выборок работников не выявлены. Такое различие между выборочными совокупностями работников до и после реализации мероприятий не позволяют судить об их эффективности. Поэтому для тестирования сформулированной гипотезы применим иные методы.

На этапе 2 анализируются результаты экспериментов для каждого мероприятия методом разности разностей (difference-in-difference) для оценки воздействия мероприятия на производительность труда в среднесрочной перспективе. Метод получил широкое распространение в задачах анализа экономической политики (Ashenfelter, Card, 1985; Sheridan, Ball, 2005; Arkhangelsky et al., 2021; Athey, Imbens, 2022). Идея метода состоит в следующем. Имеются данные о результатах наблюдения над двумя группами респондентов за два периода времени. Одна группа респондентов принимает участие в некотором эксперименте и подвергается некоторым воздействиям во втором периоде в соответствии с условиями эксперимента (treatment group). Вторая группа — не подвергается воздействиям ни в одном периоде времени (control group). Для того чтобы устранить смещение результатов наблюдений в тестовой и контрольной группах во втором периоде времени, связанное с различием между респондентами в группах, а также с возникновением трендов, не связанных с воздействием эксперимента, выполняются следующие операции. В каждом периоде определяют средние изменения (разности) результатов в тестовой и контрольной группах, а затем находят их (межпериодные) разности.

Осуществим оценку для шести выборок работников — тестовых и контрольных групп для трех мероприятий. Для корректного применения метода разности разностей используются показатели в темповой записи. Средние темпы роста производительности труда для разных мероприятий позволяют оценить частный предполагаемый эффект от их реализации методом разности разностей и представлены в табл. 1.

Для моделирования истинного (совокупного) влияния мероприятия на уровень производительности труда всех работников организации построим эконометрическую модель с фиктивной переменной, учитывающей применение или неприменение мероприятия. Для каждого мероприятия построим эконометрические модели изменения производительности труда в двух подвыборках вида:

$$Y_{after} - Y_{before} = \alpha_0 + a_1 D + e, \quad (1)$$

где Y_{after} — значение темпа роста производительности труда после внедрения мероприятия; Y_{before} — значение темпа роста производительности труда до внедрения мероприятия; D (фиктивная переменная) — принимает значение 1, если работник принадлежит тестовой выборке; α_0 — свободный член регрессии, отражает изменение производительности труда работников, по которым мероприятие не реализуется: $\alpha_0 = Y_{control,after} - Y_{control,before}$, $Y_{control}$ — значения темпа роста производительности труда работников, по которым мероприятие не реализуется; a_1 — регрессионный коэффициент, показывает предполагаемый совокупный эффект от мероприятия по работникам, по которым мероприятие реализуется и не реализуется:

$$\alpha_1 = (Y_{treatment,after} - Y_{treatment,before}) - (Y_{control,after} - Y_{control,before}),$$

$Y_{treatment}$ — значения темпа роста производительности труда работников, по которым мероприятие реализуется. Идентификация моделей осуществляется на основе обычного МНК, результаты моделирования представлены в табл. 2.

Анализ результатов моделирования показывает, что для выборки 1 параметр при фиктивной переменной является статистически значимым, его значение совпадает со значением, полученным в табл. 2, и отражает возможный эффект роста производительности труда по всей данной выборке работников в условиях повсеместного применения мероприятия 1. При этом для выборки 1 статистически незначимым является свободный член. Выборка 2 в целом не может явиться базисом для обоснования решения по мероприятию 2, так как она является в целом неадекватной, т.е. для группы сотрудников в выборке 2 причинно-следственная зависимость между реализацией мероприятия и ростом производительности труда не обоснована. Выборка 3 имеет статистически незначимый параметр при фиктивной переменной и в целом не отражает положительного эффекта при внедрении мероприятия 3 на рост производительности труда.

При этом необходимо отметить характер построенных моделей. Они имеют описательный характер реализации мероприятий в среднесрочной перспективе, но все они имеют слабую предсказательную способность. Описание изменения в уровне производительности труда в результате использования мероприятий вряд ли можно объяснить этими моделями. Их главный недостаток состоит в том, что переменная Y_{before} может быть коррелирована с переменной D , что смещает оценки параметров модели (1) и делает ее не применимой для анализа.

Переход к использованию предлагаемых мероприятий более привлекателен экономически для работников с низкими значениями производительности труда. У таких работников показатели эффективности труда растут быстрее, чем у работников с более высокими первоначальными уровнями. Это частично зависит и от временных факторов. Поэтому в модели (1) регрессии к среднему могут возникнуть проблемы в интерпретации результатов для таких выборок.

Таким образом, по результатам анализа построенных моделей невозможно однозначно судить об эффективности тестируемых мероприятий.

Для того чтобы нейтрализовать ошибки модели (1), сформируем модель в следующей спецификации:

$$Y_{after} - Y_{before} = \alpha_0 + a_1 D + a_2 Y_{before} + e. \tag{2}$$

Эта модель включает переменную Y_{before} как контрольную для регрессии к среднему значению. Коэффициент при фиктивной переменной D показывает, влияет ли мероприятие на изменение производительности труда работника при заданных начальных показателях. Если параметр a_1 статистически

Таблица 2. Расчетные значения параметров модели (1)

Параметр	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
	Мероприятие 1	Мероприятие 2	Мероприятие 3
Свободный член	−0,006 (0,015)	−0,034 (0,027)	0,026 (0,019)
Регрессионный коэффициент при фиктивной переменной D	0,074* (0,021)	0,0996* (0,038)	−0,006 (0,026)
Скорректированный R^2	0,232	0,128	0,025
F-критерий	12,766	6,747	0,051

Примечание. Зависимая переменная: изменение среднего темпа роста производительности труда между тестовой и контрольной подвыборками работников; «*» — статистически значимый параметр для $p < 0,05$. В скобках указаны значения стандартных ошибок параметров.

Таблица 3. Расчетные значения параметров модели (2)

Параметр	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
	Мероприятие 1	Мероприятие 2	Мероприятие 3
Регрессионный коэффициент при фиктивной переменной D	0,0238* (0,0075)	0,024 (0,0169)	-0,0227 (0,0117)
Регрессионный коэффициент при переменной Y_{before}	-1,4229* (0,0832)	-1,1995* (0,0889)	-1,0772* (0,0782)
Скорректированный R^2	0,9113	0,8487	0,8281
F-критерий	201,504	110,413	94,957

Примечание. Зависимая переменная: изменение среднего темпа роста производительности труда между тестовой и контрольной подвыборками работников; «*» — статистически значимый параметр для $p < 0,05$. В скобках указаны значения стандартных ошибок параметров.

значим, то при реализации мероприятия у работников с низкими начальными значениями темпов роста производительности труда эффективность труда растет больше, чем у работников с такими же низкими начальными значениями темпов роста производительности труда, но не подвергшихся воздействию мероприятия. Эта разница подразумевает истинный эффект от реализации мероприятия. Результаты численных экспериментов по модели (2) представлены в табл. 3.

Анализ результатов показывает, что все модели имеют высокий уровень объясняющей способности, так как коэффициенты детерминации моделей по всем выборкам достаточно высокие. Во всех моделях параметры при переменной Y_{before} являются статистически значимыми и фактически объясняют следующее.

Если параметр при переменной D — статистически значимый, то можно выдвинуть предположение относительно проверяемой гипотезы: истинный эффект мероприятия (в данном случае мероприятия 1 по введению частичного дистанционного режима работы) в выборке работников достаточно эффективен, так как в тестовой подвыборке имеются работники с низкими начальными значениями производительности труда, сильно отличающиеся от средних значений по контрольной подвыборке работников. Поэтому последствия реализации данного мероприятия у таких работников были бы выше, чем последствия отказа от применения этого мероприятия.

Таким образом, по выборке 1 гипотеза о наличии причинно-следственной связи между применением мероприятия 1 и ростом производительности труда могла бы быть принята как правильная. А применение этого мероприятия в коллективах, имеющих низкие значения эффективности труда, было бы экономически целесообразным. В моделях типа (2), построенных по выборкам 2 и 3, параметр при фиктивной переменной не является статистически значимым. В целом для выборок 2 и 3 мероприятия 2 и 3 не приносят требуемых результатов и не способствуют росту производительности труда в целом по выборкам.

3.2. Оценка полного эффекта воздействия. Построение и исследование байесовской сети

Метод разности разностей обладает рядом существенных недостатков, связанных с невозможностью учета влияния на производительность труда косвенных (латентных) факторов. Для преодоления этого недостатка следует использовать аппарат байесовских сетей, представляющих ориентированный ациклический граф на случайных величинах, обладающих марковскими свойствами. Для оценки полного эффекта действия конкурирующих мероприятий на производительность труда используется концепция интервенции Дж. Перла (Pearl, 2009; Слуцкий, 2019).

На этапе 3 осуществляется дизайн и исследование байесовской сети. Важность байесовских сетей заключается в том, что она позволяет проследить влияние одной переменной на другую по причинно-следственным цепочкам.

Рассмотрим задачу определения прямых и косвенных факторов, влияющих на производительность труда. Составим следующую архитектуру байесовской сети (рис. 2). Эта архитектура сети представляет собой причинно-следственные

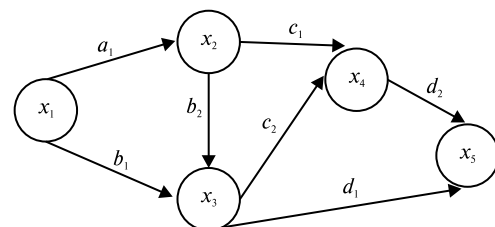


Рис. 2. Байесовская сеть влияния факторов на производительность труда

связи между набором факторов, характеризующих человеческий и социальный капиталы, мотивацию и инновационность работника, и управленческими решениями (тестируемыми мероприятиями), воздействующими на эффективность труда. Содержательный анализ механизмов влияния социального капитала и инновационности работников был представлен в работе (Орлова, 2022б), количественная оценка такого влияния детально обсуждалась в статье (Orlova, 2022a). Построение архитектуры сети обусловлено исследованием механизмов влияния факторов социального капитала, инновационности, мотивации работников и производительности труда, осуществляется аналитически с учетом знания свойств и принципов функционирования объекта моделирования. Такое формирование архитектуры может рассматриваться как элемент структурного моделирования.

Обозначения переменных в сети: x_1 — тестируемое мероприятие M1, ..., M3; x_2 — социальный капитал (индекс); x_3 — мотивация (индекс); x_4 — инновационность (в виде индекса); x_5 — индивидуальная производительность труда.

Нас будет интересовать, как реализация того или иного мероприятия (управленческого решения) M1, ..., M3 отразится на производительности труда, т.е. как фактор x_1 отразится на факторе x_5 в условиях действия факторов социального капитала и инновационности работников. Марковское свойство заключается в том, что прямые причины для фактора x_5 информационно блокируют все остальные вершины графа, кроме тех, которые являются прямыми или опосредованными следствиями x_5 . Иными словами, вся информация о факторе x_5 , содержащаяся в переменных сети, кроме вершин-следствий x_5 , полностью заключается в его прямых вершинах.

Будем использовать понятие «интервенция» (оператор do), введенное Дж. Перлом (Pearl, 1995), для того чтобы получить совместное вероятностное распределение переменных сети при фиксировании, закреплении за переменной x_1 некоторого значения, соответствующего одному из трех мероприятий $\text{do}(x_1 = x_0)$, где

$$x_0 = \begin{cases} 1, & \text{если мероприятие реализуется;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Требуется выяснить, как будет изменяться распределение переменной x_5 в зависимости от реализуемого управленческого решения (мероприятия).

Основываясь на концепции оператора do, можно сформулировать определение причинности (Peters, Janzing, Scholkopf, 2017; Слуцкий, 2019).

Определение. Вершина x_i является *причиной* для x_j , если существует хотя бы два значения $a, b, a \neq b$, так что выполняется

$$p(x_j | \text{do}(x_i = a)) \neq p(x_j | \text{do}(x_i = b)). \quad (3)$$

То есть фактор x_i является причиной для x_j , если при выполнении интервенций (быть может, виртуально) со стороны x_i меняется вероятностный характер x_j .

Определим полный эффект действия мероприятия x_1 на производительность труда x_5 при помощи понятия «интервенция». Для этого представим байесовскую сеть аналитически в виде системы структурных уравнений, когда каждой вершине (кроме экзогенных) ставится в соответствие уравнение регрессии этой вершины по всем ее прямым вершинам. Далее определим коэффициент полного действия x_1 на x_5 , исходя из следующей теоремы.

Теорема (Rosenbaum, Rubin, 1982). Коэффициент полного эффекта действия x_i на x_j равен сумме произведений коэффициентов регрессии вдоль всех путей, ведущих от x_i к x_j :

$$k_{x_i, x_j} = \sum_{x_{i_1}, \dots, x_{i_j}} k_{x_{i_1}, x_{i_2}} \times \dots \times k_{x_{i_{j-1}}, x_{i_j}}. \quad (4)$$

Рассмотрим пути (последовательности) стрелок, ведущих от x_1 к x_5 . Каждая причинно-следственная пара на диаграмме определяет коэффициент для соответствующей стрелки — величину эффекта от прямой причины. Имеем пять путей из вершины x_1 в вершину x_5 : I) $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5$; II) $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5$; III) $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5$; IV) $x_1 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5$; V) $x_1 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5$.

Обозначения коэффициентов k введем так, как показано на рис. 2. Запишем байесовскую сеть в виде системы уравнений:

$$x_2 = a_1 x_1 + \varepsilon_2, \quad (5)$$

$$x_3 = b_1x_1 + b_2x_2 + \varepsilon_3, \quad (6)$$

$$x_4 = c_1x_2 + c_2x_3 + \varepsilon_4, \quad (7)$$

$$x_5 = d_1x_3 + d_2x_4 + \varepsilon_5. \quad (8)$$

Выполним преобразования. Подставим (5) в (6):

$$x_3 = b_1x_1 + b_2(a_1x_1 + \varepsilon_2) + \varepsilon_3 = b_1x_1 + a_1b_2x_1 + \varepsilon'_3. \quad (9)$$

Далее подставим (10) и (5) в (8):

$$x_4 = c_1(a_1x_1 + \varepsilon_2) + c_2(b_1x_1 + a_1b_2x_1 + \varepsilon'_3) + \varepsilon_4 = a_1c_1x_1 + b_2c_2x_1 + a_1b_2c_2x_1 + \varepsilon'_4. \quad (10)$$

Итоговая подстановка (11) и (10) в (9) примет вид:

$$\begin{aligned} x_5 &= d_1(b_1x_1 + a_1b_2x_1 + \varepsilon'_3) + d_2(a_1c_1x_1 + b_2c_2x_1 + a_1b_2c_2x_1 + \varepsilon'_4) + \varepsilon_5 = \\ &= b_1d_1x_1 + a_1b_2d_1x_1 + a_1c_1d_2x_1 + b_1c_2d_2x_1 + a_1b_2c_2d_2x_1 + \varepsilon', \end{aligned} \quad (11)$$

где ε' — линейная комбинация ошибок $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_5$.

Коэффициент полного эффекта действия x_1 на x_5 равен сумме произведений коэффициентов регрессии вдоль путей I–V, ведущих из вершины x_1 в вершину x_5 :

$$k = b_1d_1 + a_1b_2d_1 + a_1c_1d_2 + b_1c_2d_2 + a_1b_2c_2d_2.$$

Причинно-следственные цепочки в байесовской сети представляют собой действие передаточного механизма от фактора x_1 к x_5 , а коэффициент k — количественное выражение действия этого механизма. Коэффициент полного эффекта оценивает результат воздействия на производительность труда тестируемого управленческого решения (мероприятия M1, ..., M3), анализируя цепочки от x_1 к x_5 . То есть от включения (применения) мероприятия можно получить ясное понимание процесса образования причинно-следственных связей, ведущих от x_1 к x_5 . На основе такого анализа формируются следующие заключения:

— сопоставляются управленческие решения M1, ..., M3 по значениям их коэффициентов полного эффекта на производительность труда x_5 и выявляется то, которое обладает большим эффектом;

— внутри сети, исходя из ранжирования цепочек по вкладу их влияния на коэффициент полного эффекта; внутри каждой цепочки определяется точный вклад каждой переменной на результирующий показатель x_5 .

На основе исходных данных о контролируемых факторах — реализации мероприятий; данных, полученных по результатам анкетирования для оценки социального капитала; инновационности и мотивации сотрудников, а также данных расчета индивидуальной производительности труда в разрезе экспериментальных и контрольных выборок¹ были рассчитаны оценки параметров моделей (5)–(8) (табл. 4). Отметим, что одной из практических трудностей применения байесовской сети с большим числом узлов и путей является рост числа уравнений в системе и проверка для каждого из них условий Гаусса–Маркова.

Результаты оценки полного эффекта мероприятий M1, ..., M3, а также эффектов вдоль всех путей, ведущих от x_1 к x_5 , представлены в табл. 5.

Таблица 4. Оценки параметров моделей (5)–(8)

Параметр	Значение параметра		
	M1	M2	M3
a_1	2,25*	2,33*	2,12*
b_1	0,06	0,07	0,009
b_2	0,33*	0,17*	0,202*
c_1	0,27*	0,47*	0,53*
c_2	1,54*	1,36*	0,87
d_1	116,95	–66,1	–11,66
d_2	66,8	207,3*	159,4

Примечание. «*» обозначен статистически значимый параметр для $p < 0,05$.

¹ Подробно методы и алгоритмы такого исследования приведены в (Orlova, 2021a, 2021b, 2022b).

Таблица 5. Оценка полного эффекта мероприятий на производительность труда

Путь в байесовской сети и комбинация коэффициентов		Тестируемое мероприятие		
		M1	M2	M3
I	$x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 (a_1 c_1 d_2)$	40,58	227,01	179,10
II	$x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5 (a_1 b_2 d_1)$	86,84	-26,18	-4,99
III	$x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 (a_1 b_2 c_2 d_2)$	76,38	111,67	59,39
IV	$x_1 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5 (b_1 d_1)$	7,02	-4,63	-0,10
V	$x_1 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 (b_1 c_2 d_2)$	6,17	19,73	1,25
Полный эффект		216,99	327,61	234,64

Полученные результаты демонстрируют, что самым высоким полным эффектом в условиях множества факторов, действующих на производительность труда, обладает мероприятие, связанное с введением рейтингов сотрудников, подразделений и премированием. Вторым по размеру эффекта является мероприятие, направленное на стажировки сотрудников, а самым низким эффектом — мероприятие, направленное на переход на частично дистанционный режим работы сотрудников. Эти результаты отличаются от результатов сопоставления мероприятий, полученных на основе оценки их частного воздействия на производительность труда (п. 3.1).

Цепочка I ($x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5$) сети при реализации мероприятия M2 дает наибольший вклад в формирование полного воздействия на производительность труда. Этот путь включает социальный капитал и инновационность сотрудников. Очевидно, что у сотрудников в экспериментальной группе в условиях реализации мероприятия производительность труда и ее рост зависят от уровней социального капитала и инновационности.

Мероприятие M1, направленное на внедрение частично дистанционного режима работы, имеет две цепочки — II ($x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5$) и III ($x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5$) с наибольшим вкладом в полный эффект. Эти цепочки вовлекают мотивацию как фактор, имеющий опосредованную связь между реализацией этого мероприятия и ростом производительности труда.

При реализации мероприятия M3 (стажировки в ведущих компаниях) цепочка сети, проходящая через вершину x_2 (социальный капитал), дает наибольший вклад. Это мероприятие целесообразно реализовывать у работников, которые обладают высокими коммуникативными способностями, — они креативны и могут внедрять опыт других компаний, готовы идти на определенный риск при реализации новых проектов. Выявление таких сотрудников представляет дополнительную задачу, которая может быть решена на основе дополнительной экспертной информации.

Задача, поставленная в настоящей работе, — обоснование причинной связи между реализацией мероприятия и ростом производительности труда, выполнена. Показано, что такая связь есть, но внедрение мероприятий должно быть дифференцированным и зависеть от начальных уровней эффективности работников, их инновационности, мотивированности и социального капитала.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача управления производительностью труда работников компании на основе альтернативных управленческих решений, состоящих в проведении мотивирующих мероприятий, направленных на рост производительности труда. Для оценки эффективности и качества таких мероприятий предложено провести рандомизированные контролируемые эксперименты, отличающиеся тем, что принятие решений, связанных с внедрением мероприятий, основано на апробированных на практике результатах испытаний и их сравнительной эффективности.

Разработана технология, основанная на гибридном подходе и системной интеграции теории причинных байесовских сетей, методе статистических рандомизированных испытаний и разности разностей. Отличие предлагаемой технологии от других состоит в том, что она может определить синергетический эффект действия причины (мероприятия) на следствие (производительность труда) при наличии скрытых и влияющих на нее факторов.

Причинная байесовская сеть позволяет вычислить последствия различных мероприятий, направленных на рост производительности труда. На примере простой байесовской сети, состоящей из пяти вершин, показано, что полный эффект действия мероприятий обусловлен как взаимным

расположением факторов, так и размерами их воздействия друг на друга. Эти выводы могут быть использованы для выбора и внедрения управленческого решения с наивысшим эффектом действия.

Практическую значимость имеют результаты апробации предлагаемых теоретических положений, методов и технологии на фактических данных о деятельности предприятия сферы питания. Полученные результаты будут способствовать эффективному использованию разработанной технологии, направленной на обеспечение роста производительности труда в условиях неопределенности внешней и внутренней среды, позволят обеспечить устойчивое развитие и рост доходности предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Бахтизин А.Р.** (2008). Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика. 279 с. [Bakhtizin A.R. (2008). *Agent-based models of the economy*. Moscow: Ekonomika. 279 p. (in Russian).]
- Орлова Е.В.** (2022a). Системный инжиниринг цифровых двойников организационно-технических систем с использованием методов интеллектуального анализа // *Программная инженерия*. Т. 13. № 9. С. 425–440. DOI: 10.17587/prin.13.425-440 [Orlova E.V. (2022a). System engineering of the organizational and technical systems' digital twins using artificial intelligence methods. *Programmnaya Ingeneria (Software Engineering)*, 13, 9, 425–439. DOI: 10.17587/prin.13.425-440 (in Russian).]
- Орлова Е.В.** (2022b). Влияние социального капитала компании на инновационность личности в России: экономические механизмы и диагностический инструментарий // *Journal of Applied Economic Research*. Т. 21. № 3. С. 545–575. DOI: 10.15826/vestnik.2022.21.3.019 [Orlova E.V. (2022b). Impact of companies' social capital on person's innovativeness in Russia: Economic mechanisms and diagnostic tools. *Journal of Applied Economic Research*, 21, 3, 545–575. DOI: 10.15826/vestnik.2022.21.3.019 (in Russian).]
- Слущкин Л.Н.** (2019). Моделирование причинных зависимостей в экономике (научный доклад). М.: Институт экономики РАН. 42 с. Режим доступа: https://inecon.org/docs/2019/Slutskin_paper_2019.pdf [Slutskin L.N. (2019). *Modeling causal dependencies in economics (report)*. Moscow: Institute of Economics RAS. 43 p. Available at: https://inecon.org/docs/2019/Slutskin_paper_2019.pdf (in Russian).]
- Arkhangelsky D.Y., Athey S., Hirshberg D.A., Imbens G.W., Wager S.** (2021). Synthetic difference-in-differences. *American Economic Review*, 111, 12, 4088–4118.
- Armstrong M.** (2008). *Strategic human resource management*. London: Kogan Pag.
- Ashenfelter O., Card D.** (1985). Using the longitudinal structure of earnings to estimate the effect of training programs. *The Review of Economics and Statistics*, 67, 4, 648–660. DOI: 10.2307/1924810
- Athey S., Imbens G.W.** (2022). Design-based analysis in difference-in-differences settings with staggered adoption. *Journal of Econometrics*, 226, 1, 62–79. DOI: 10.1016/j.jeconom.2020.10.012
- Bryson J.M., Ackermann F.M., Eden C., Finn C.B.** (2004). *Visible thinking: Unlocking causal mapping for practical business results*. N.Y.: Wiley & Sons. 396 p.
- Edvinsson L., Mallone M.S.** (2007). *Intellectual capital: Realizing your company's true value by finding its hidden brain power*. N.Y.: Harper Business.
- Gratton L., Ghoshal S.** (2003). Managing personal human capital: New ethos for the 'volunteer' employee. *European Management Journal*, 21, 1, 1–10.
- Orlova E.V.** (2021a). Innovation in company labor productivity management: Data science methods application. *Applied System Innovation*, 4, 3, 68. DOI: 10.3390/asi4030068
- Orlova E.V.** (2021b). Design of personal trajectories for employees' professional development in the knowledge society under Industry 5.0 *Social Sciences*, 10, 11, 427. DOI: 10.3390/socsci10110427
- Orlova E.V.** (2022a). Methodology and Statistical modeling of social capital influence on employees' individual innovativeness in a company. *Mathematics*, 10, 11, 1809. DOI:10.3390/math10111809
- Orlova E.V.** (2022b) Technique for data analysis and modeling in economics, finance and business using machine learning methods. *IEEE Proceedings of 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 369–374. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973885
- Pearl J.** (1995). Causal diagrams for empirical research. *Biometrika*, 82, 669–710.
- Pearl J.** (2009). Causal inference in statistics: An overview. *Statistical Survey*, 3, 96–146. DOI: 10.1214/09-SS057
- Pearl J.** (2021). Radical empiricism and machine learning research. *Journal of Causal Inference*, 9, 78–82. DOI: 10.1515/jci-2021-0006
- Peters J., Janzing D., Scholkopf B.** (2017). *Elements of causal inference foundations and learning algorithms*. London: The MIT Press Cambridge.

- Rosenbaum P.R., Rubin D.B. (1982). The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70, 41–55.
- Samad S. (2020). Achieving innovative firm performance through human capital and the effect of social capital. *Management and Marketing*, 15, 2, 326–344.
- Sheridan N., Ball L. (2005). Does inflation targeting matter? In: *The inflation targeting debate*. Chicago: University of Chicago Press for the National Bureau of Economic Research, 249–276.
- Youndt M.A. (2000). *Human resource configurations and value creation: The mediating role of intellectual capital*. Toronto: Annual Conference of the Academy of Management.

Hybrid approach to modeling labor productivity factors: Synthesis of randomized controlled experiments and causal Bayesian networks

© 2024 E.V. Orlova

E.V. Orlova,

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; e-mail: ekorl@mail.ru

Received 26.03.2023

Abstract. Solving the problem of effective management of labor productivity of company employees, taking into account many heterogeneous factors, often of a stochastic, non-stationary and non-linear nature, embedded in complex chains of cause-and-effect interactions in the context of digital transformation of the economy presents certain difficulties. The paper proposes a technology that ensures, with a high degree of certainty, the establishment of causal relationship between the implementation of alternative management decisions and the productivity of company employees, and is designed to select solutions based on an assessment of the effect of their impact on labor productivity. The novelty of the proposed technology is based on a hybrid approach to modeling the object of study and combines two models. The first model — a structural model built on the basis of a priori knowledge of the laws of functioning and development and providing a causal understanding of the object and capable of predicting the effect of factors (explicit and indirect). The second model — a model based on data, which is tuned (adapted) taking into account empirical data obtained as a result of observation (measurement) of an object. The developed technology uses heterogeneous research methods — a randomized controlled experiment to obtain information about the tested activities, statistical data analysis — descriptive data analysis, correlation and regression analysis, the difference-difference method to establish a causal relationship between the implemented event and the growth of labor productivity, a Bayesian network of causality for building and analyzing a structural model of an object and explaining the causal relationships of explicit and hidden factors that affect labor productivity in the context of the implementation of measures. Of practical significance are the results of testing the proposed theoretical provisions, methods and technologies on actual data on the activities of a food service companies. The results obtained will contribute to the effective use of the developed technology aimed at ensuring the growth of labor productivity under uncertainty in the external and internal environment and will contribute to the sustainable development of companies and the growth of their profitability.

Keywords: labor productivity of employees in the company; randomized controlled experiments; causal Bayesian network; causal links; hybrid approach.

JEL Classification: C32; C53; C61; O15.

UDC: 330.4, 519.865.7

For reference: **Orlova E.V.** (2024). Hybrid approach to modeling labor productivity factors: Synthesis of randomized controlled experiments and causal Bayesian networks. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 1, 108–120. DOI: 10.31857/S0424738824010099 (in Russian).