

Мягкие и жёсткие модели образовательных систем: исследование причинности

Андрей Константинович Колесников,

профессор, ректор Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, кандидат физико-математических наук

Ирина Павловна Лебедева,

профессор философско-социологического факультета Пермского национального исследовательского университета, доктор педагогических наук

• мягкие модели • жёсткие модели • образовательная система • причинность •

Проблема исследования причинности относится к числу основных для науки, философское осмысление результатов которой привело к созданию учения о всеобщей закономерной связи и причинной обусловленности явлений и процессов окружающего мира. Один из важных аспектов исследования причинности — взаимоотношение причины и случайности. В современной науке сложилось представление о том, что статистические законы являются наиболее глубокой и общей формой описания процессов окружающего мира. Для социальных систем, в том числе и образовательных, случайность является фундаментальным понятием, выполняющим методологическую функцию в исследовании закономерностей их развития. Оно происходит под влиянием множества случайных факторов, учесть которые в полной мере практически не удаётся.

В этой связи особую роль в обосновании системы знаний, контроля объективности полученных результатов и построения моделей действительности играют математи-

ческие методы, которые целесообразно рассматривать с позиции использования для выявления причинных от-

ношений¹. Применение математического аппарата требует формализации предмета познания, приводящей к конкретизации указанной проблемы до уровня постановки задачи выяснения специфических причин. Понимание их сути в значительной мере определяется исходными содержательными идеями и концепциями и предполагает не только выявление типа причинно-следственной связи, но и характера взаимодействия причины и следствия. Поэтому необходимо изучение изменений состояний системы, т.е. исследование её параметров в динамике, в частности, с течением времени. Для социальных явлений во всём многообразии и сложности их взаимодействия важно определить направленность таких изменений.

Причинно-следственные связи для конкретной совокупности состояний системы возникают под влиянием её предыдущих состояний и целенаправленного воздействия определённых факторов. Учитывая это, а также определённые параметры функционирования системы, можно выдвинуть гипотезу о характере причинных связей. В социально-педагогическом исследовании особое значение имеет её обоснованность. Основания для выдвижения гипотезы о причинно-следственных отношениях можно найти, рассматривая этапы научного мето-

¹ Kolésnikov A.K., Lebedeva I.P. Investigation of causality based on complex use of statistical methods (case study of social research). Quality & Quantity. 2012, DOI: 10.1007/s11135-012-9702-7.

да познания с позиции систематизации и структурно-количественного анализа выявленных эмпирических фактов. Количественная формулировка качественно установленных фактов позволяет представить гипотезу в конструктивном виде, выдвигая предположение о характере связей между величинами.

Фундаментальный принцип проверки гипотезы о причинных связях основан на кибернетической модели «чёрного ящика». Однако в социальном исследовании её применение весьма ограничено. Во-первых, подобные абстракции не оправдывают себя, т.к. далеки от социальных реалий. Во-вторых, они отражают функциональные зависимости, которые характеризуют лишь отдельные стороны поведения системы. В-третьих, в соответствии с данной моделью осуществляется постановка эксперимента, которая является довольно сложным процессом, поскольку необходимо учитывать множество факторов, способных повлиять на точность и научную ценность результата.

Разработано множество способов исключения влияния посторонних переменных в условиях эксперимента. Однако невозможно добиться полного контроля исследуемого фактора и нивелировать воздействие случайных факторов. В итоге полученный результат оказывается приближенным. Для социально-педагогической системы типична ситуация, когда практически невозможно даже выделить влияние различных факторов. В отношении них могут быть лишь определённые теоретические предположения, в которых полученные эмпирические данные не соотносятся с условиями эксперимента. В эксперименте же моделируется определённая ситуация, отличающаяся от реальной в силу действия неучтённых случайных факторов. Отсюда следует ограниченность эксперимента для исследования образовательных систем и необходимость использования неэкспериментальных данных.

В случае экспериментальных данных, учитывая воздействия на систему (входные параметры) и их результаты (выходные параметры) в динамике, считают, что вторые являются следствием первых. Действительно, для решения некоторых частных задач

этого достаточно, если правильно определена совокупность входных и выходных параметров (что совсем нетривиально). Тогда остаётся построить лишь подходящую статистическую зависимость. Простота модели «чёрного ящика» является кажущейся, поскольку рассмотрение обратной связи, т.е. влияния следствия на причину и взаимодействий между ними, приводит к существенному усложнению исходной модели, необходимости проведения лонгитюдного исследования, оценки интегративных эффектов и выявления тенденций в изменении состояний системы.

Для неэкспериментальных данных традиционно рассматривают корреляционный анализ как основу возникновения гипотезы о причинной связи. Учитывая множество факторов, определяющих взаимосвязь показателей, данная гипотеза может оказаться маловероятной. Повысить её обоснованность с тем, чтобы сделать продуктивным последующий анализ данных, возможно, если учитывать временной фактор и обеспечить необходимую полноту и структурированность показателей, которые в полной мере должны отражать исследуемое явление. Определение типа связей между ними позволяет наметить процедуру дальнейшего анализа данных. Для объяснения этих связей применяют факторный анализ, предназначенный для выявления латентных факторов.

Таким образом, причинные отношения в исследовании образовательных систем отражают, прежде всего, определённые тенденции в их функционировании и развитии, поиск которых предполагает интеграцию качественного и количественного подходов. В рамках качественного подхода решаются задачи понимания и интерпретации полученной информации и затем — её концептуализации. Количественный подход используется с целью объяснения причинности и измерения взаимосвязей, что и определяет содержание операций в процессе его реализации. Получение научного знания с позиции указанного подхода должно быть доказательно и последовательно построено на основе эмпирических данных.

Следуя логике научного метода, эти подходы взаимно дополняют друга и в единстве реализуемых ими стратегий исследования

способствуют выявлению причинно-следственных отношений. Возникает проблема интеграции этих подходов, которая обусловлена:

- переходом от концептуальной к формальной (в частности, математической) модели;
- интерпретацией математической модели.

Однако механизмы такой интеграции не разработаны в силу сложности перехода от концептуальной к математической постановке задачи, который всегда сопровождается потерей качественного содержания изучаемого явления. А поскольку образовательные системы слабо формализуемы, то такая потеря неизбежна. Актуальна проблема её минимизации, которая может быть решена за счёт целесообразной интеграции качественного и количественного подходов при ведущей роли первого. Одним из способов её осуществления является использование мягких моделей для аналитического представления причинных связей. Они имеют вероятностный характер, определяемый стохастической природой социальных явлений и процессов.

С помощью мягких моделей фиксируются общие тенденции, качественно интерпретируемые. Жёсткие модели получают по отношению к локальным условиям. Если построен целый класс жёстких моделей, которые применимы к идеализированным ситуациям, то на их основе можно получить мягкую модель, приближенно описывающую общую тенденцию (В.И. Арнольд). Тогда полученные мягкие модели являются научно обоснованными и практически полезными. В этом смысле мягкие модели служат приближенным описанием класса жёстких моделей. Но для образовательных систем построение последних не всегда не только целесообразно, но и даже возможно. Интерпретация жёстких моделей осуществляется на математическом языке. Мягкие же модели допускают только качественную интерпретацию.

Приведём пример. В реальном процессе обучения фактически реализуются некие статистические взаимосвязи между

параметрами сложности и трудности предмета изучения:

$$T_i = T_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

где T_i — параметры трудности, x_1, x_2, \dots, x_n — параметры сложности, представляющие собой количественные характеристики предмета изучения. Так, для учебных текстов x_1 — характеристика «размеров» (объёма) текста, x_2 — объединённая и усреднённая оценка всего набора и структуры объектов текста (основных понятий, символов, терминов и т.п.); x_3 — аналогичная оценка его логических конструкций (принципиально важные для понимания смысла текста взаимосвязи объектов)².

В простейшем случае эти взаимосвязи могут иметь вид регрессионного уравнения:

$$T = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d.$$

Причём все коэффициенты уравнения должны быть положительны в силу очевидной тенденции: чем больше по величине показатели сложности, тем больше трудность. Интерес же представляют локальные модели таких взаимосвязей, полученные для конкретных условий (учебной дисциплины, темы, контингента обучаемых и т.д.), в которых коэффициенты a, b, c оценены и равны определённым числам. В случае адекватной модели (в соответствии с определёнными статистическими критериями) данную модель можно использовать для прогнозирования трудности по показателям сложности, определяя рациональные способы их вариации с учётом поставленных дидактических целей.

Такой прогноз (с определением величины доверительного интервала) имеет важное значение для организации процесса обучения в силу его временных рамок. Указанные модели являются жёсткими, и они применимы для ограниченных и однозначно зафиксированных локальных условий. При их изменении изменится и модель (величина коэффициентов a, b, c), но общая тенденция взаимосвязи, как свидетельствуют результаты исследований, между ними сохраняется.

Обратим внимание на то, что учебные тексты, в частности, математические, допуска-

² Пехлецкий И.Д. Сложность и трудность учебных текстов и задач. Пермь: Изд-во Перм. гос. пед. ун-та, 2008. 101 с.

ки реализуются некие статистические взаимосвязи между

ют необходимую для моделирования формализацию. Параметры сложности в полной мере отражают их структуру (существенные связи, важные для познания изучаемого предмета). Однако не каждая образовательная система допускают аналогичную степень формализации. Поэтому жёсткие модели не всегда адекватно отражают её сущность. Тогда для моделирования взаимосвязей между параметрами структуры этой системы более подходящими будут мягкие модели.

Например, представляет интерес общая тенденция взаимосвязи между обучаемостью и факторами, её определяющими. Если учитывать приобретённые учеником познавательные возможности после взаимодействия с предметом изучения, можно выделить три уровня обучаемости: детерминированный (запоминание материала, действие по заданным алгоритмам), технологический (овладение методами использования новых знаний в разных практических ситуациях), методологический (овладение методологией применения полученных знаний).

Учитывая природу обучаемости, естественно предположить, что её уровень зависит не от отдельного фактора, а от комплекса факторов, гармонично взаимосвязанных друг с другом и относящихся к различным сферам (интеллектуальной, мотивационной и др.). Очевидно, что влияние этих факторов на разные компоненты обучаемости может быть существенно разным. Сравнительные оценки этого влияния были получены на основе линейных множественных регрессионных уравнений.

В результате выяснилось, что ведущую роль для методологической обучаемости играют познавательный интерес, компоненты невербального интеллекта и качество знаний. Для детерминированной и технологической обучаемости значимость указанных факторов другая: на первый план выступает качество знаний, затем — познавательный интерес и показатели интеллекта. Причём теснота связей для методологической обучаемости меньше, чем для детерминированной и технологической, что естественно объясняется большей стохастичностью закономерностей, связанных с высшими уровнями функционирования психики.

В данном случае получено множество статистически точных математических моделей соответствующих взаимосвязей в разных выборках учащихся. Обозначенная тенденция действия факторов обучаемости отражает в целом суть зафиксированных в них взаимосвязей. Для указанной ситуации важно выявление и ранжирование факторов, влияющих на каждый уровень обучаемости для школьников. Количественные оценки такого влияния не имеют особого смысла в силу слабой формализуемости и динамичности рассматриваемых познавательных процессов.

Таким образом, построение так называемых жёстких моделей для локальных условий функционирования образовательной системы недостаточно для отражения причинных связей в ней, поскольку они обладают свойством «насыщения» и поэтому сохраняют свою полезность для определённого диапазона изменения значений факторных признаков. Локальный характер таких моделей свидетельствует о неустойчивости причинных связей или точнее — их динамичности. В некоторых случаях построение жёстких моделей не только нецелесообразно, но и просто невозможно, например, для качественных признаков. Тогда мягкую модель для качественных данных можно попытаться рассмотреть без соотнесения её с классом соответствующих жёстких моделей, построенных для количественных показателей.

Одно из основных назначений математических моделей — прогнозирование изменений зависимой переменной при соответствующих вариациях независимой переменной. При их высокой статистической точности можно полагать, что в будущем влияние независимых переменных на зависимую переменную будет аналогичным. Очевидна ограниченность прогностических свойств мягких моделей, поскольку они могут быть использованы только для весьма приближённой (качественной) экстраполяции тенденций без получения оценок надёжности и точности прогноза. В то время как построение жёстких моделей имеет целью прогнозирование на их основе. Но при этом даже «жёсткую» модель всегда надлежит исследовать на структурную устойчивость полученных при её изучении результатов по отношению к

малым изменениям модели (делающим её мягкой)»³.

В любом случае при построении модели делают ряд статистических предположений. Их истинность часто остаётся под вопросом. Поэтому уместным вопросом будет не «идеально ли модель согласуется с данными?», а «согласуется ли она достаточно хорошо, чтобы получить новую информацию об объекте исследования, объяснить структуру данных и быть полезной для практического применения?». Идеальное соответствие модели данным не означает, что она верна. Можно построить другие модели, так же хорошо согласуемые с исходными данными. Отсюда возникает необходимость правильной интерпретации, определения научной и практической ценности полученной модели и возможностей прогнозирования на её основе.

Наиболее перспективной, как нам представляется, для исследования причинности является иерархическая комбинация мягких и жёстких моделей в виде последовательности этапов комплексного статистического анализа эмпирических данных. Эти этапы отражают возникновение причинно-следственных связей для фиксированной совокупности состояний системы с учётом её предыдущих состояний и целенаправленного воздействия специфических факторов. Сочетание мягких и жёстких моделей определяется задачами исследования, при решении которых нельзя не иметь в виду, что объективно присущая социальной системе неопределённость функционирования может усиливаться, благодаря использованию неадекватных способов исследования причинности.

Таким образом, мягкие модели рассматривают, прежде всего, с позиции их практи-

ческой значимости, поскольку они определяют общие ориентиры в развитии социально-педагогической системы. «Попытки заменить мягкое моделирование жёстким обычно приводят к иерархии всё более

сложных и громоздких математических построений, ... реальная ценность которых зачастую не превосходит в сущности простых (хотя без математики и не очевидных) выводов, основанных на анализе именно простейших моделей...»⁴. Поэтому ключевым моментом в исследовании причинных связей является верификация модели и оценка её значимости для решения конкретной практической задачи. Если выделенные и зафиксированные в количественной форме причинные отношения повышают эффективность её решения, тогда их целесообразно рассматривать как вариант модели таких отношений.

Учитывая специфику социально-педагогической системы, может быть сформирована методика анализа причинности на основе сочетания мягких и жёстких моделей взаимосвязей факторов (в том числе латентных). Для случая неэкспериментальных данных она предполагает:

1. Формирование совокупности критериев как результативных признаков, в соответствии с которыми оценивается достижение поставленной цели.
2. Конкретизация критериев в виде системы показателей, достаточно полно описывающих предмет исследования в рамках выбранной концепции, и разработка способов их измерения.
3. Фиксирование иерархии основной структуры системы в соответствии с выделенными критериями.
4. Поиск латентных факторов, соответствующих каждому уровню иерархии, и исследование их структуры.
5. Определение направленности взаимодействия факторов и причинных отношений между ними.
6. Моделирование взаимосвязей между факторами и результативным признаком.

Вариант практической реализации данной методики рассмотрен в работе авторов статьи⁵. Приведём пример одного из её фрагментов, отражающих комбинацию жёстких и мягких моделей в процессе исследования факторов удовлетворённости потребителей

³ Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. Доклад на семинаре при Президентском Совете РФ. <http://mat.1september.ru/articles/2009/06/09> (доступ 31.01.13)

⁴ Там же.

⁵ Колесников А.К., Лебедева И.П. Моделирование удовлетворенности потребителей образовательными услугами высшей школы // Высшее образование в России. 2012. №12. С. 37–45.

образовательной услугой высшей школы. На завершающем этапе обучения в вузе наиболее ярко проявляется взаимодействие внутренних и внешних факторов, характеризующих общую удовлетворённость студентов профилем обучения как одного из важных критериев качества образовательной услуги.

Эти факторы являются специфическими, поскольку связаны с особенностями конкретной образовательной и социально-экономической среды, которая и определяет границы их содержательной интерпретации. Поэтому теоретический интерес представляют способы выявления причинных связей, основанные на использовании статистических методов и математического моделирования. Учитывая цель и динамику функционирования данной социально-педагогической системы, в качестве зависимых переменных будут выступать факторы удовлетворённости профилем подготовки, а в качестве независимых переменных – отдельной образовательной услугой (изучением конкретной учебной дисциплины). Рассмотрим случай, когда выборка представлена шестью вузами разного направления и профиля подготовки г. Перми ($N > 2000$), что позволяет исследовать общие и специфические тенденции взаимодействия факторов.

Однако сами факторы могут иметь определённую структуру в рамках используемого теоретического подхода к измерению удовлетворённости потребителей. Один из них связан с теорией подтверждения/неподтверждения, в которой удовлетворённость потребителей рассматривается как результат процесса сравнения между ожиданиями (как вариант – уровнем требований) потребителя и восприятием им фактически оказанных услуг. Тогда потребитель оценивает исполнение услуги и её важность по предложенным характеристикам. Факторы удовлетворённости могут учитывать как удовлетворённость исполнением услуги, так и её важность или одновременно и то, и другое.

С целью измерения характеристик удовлетворённости образовательной услугой разработаны специальные анкеты, которые проводятся анонимно, а соответствующие показатели усредняются для каждой сту-

денческой группы. Для оценки удовлетворённости отдельной образовательной услугой использовались 40 показателей, а в целом профилем подготовки – 30, отражающие все основные её качественные стороны. Затем на основе данных показателей получены индексы удовлетворённости (усреднённые для каждой студенческой группы), учитывающие как оценки исполнения услуги, так и её важности.

Результаты корреляционного анализа этих характеристик свидетельствуют о целесообразности проведения факторного анализа. В итоге выделен один общий фактор (метод главных компонент, «вес» 73,3%) во всей выборочной совокупности, в который вошли все переменные с высокими отрицательными нагрузками. Он обозначен как «Дефицит общей удовлетворённости профилем подготовки».

Рассмотрим результаты факторного анализа для характеристик отдельных образовательных услуг на завершающем этапе обучения в вузе. Выделены два общих фактора. Первый фактор (вес 65,2%) имеет высокие положительные нагрузки от всех остальных переменных кроме «Содержание программы интересно» и «Изложение содержания программы доступно». Второй фактор имеет значимые положительные нагрузки от этих двух переменных (вес 25,6%).

Первый фактор обозначен «Удовлетворённость процессом и результатом оказания образовательной услуги», а второй — «Удовлетворённость содержанием образовательной программы». Выделенные факторы объясняют структуру взаимосвязей между характеристиками образовательной услуги. В данном случае оказывается важной совокупность процессуальных характеристик оказания образовательной услуги и её результат, а затем – доступность и интересность её содержания.

В результате регрессионного анализа получено уравнение:

$$F = -0,47 \times F_2$$

($N = 40$; $R = 0,47$; $p < 0,05$),

где F — фактор «Дефицит общей удовлетворённости профилем подготовки»; F_2 —

«Удовлетворённость содержанием образовательной программы».

Адекватных нелинейных регрессионных моделей построить не удалось. Данная однофакторная линейная модель означает, что с увеличением удовлетворённости интересностью и доступностью содержания образовательной программы на 1 балл дефицит общей удовлетворённости уменьшается на 0,47 балла.

В этой связи имеет смысл дифференцированный регрессионный анализ, когда в случае зависимой переменной выступают отдельные характеристики удовлетворённости профилем подготовки. Из полученных нами уравнений ясно, что чем выше удовлетворённость содержанием программы, тем выше удовлетворённость в целом профилем подготовки, освоением программы и развитием способностей. Причём для развития способностей более важную роль играют также процессуальные характеристики оказания услуги и результат. Для других характеристик удовлетворённости профилем подготовки (качество ресурсного обеспечения образовательной программы, престижность вуза, перспективы профессиональной деятельности) не удалось построить адекватных регрессионных моделей.

Заметим, что все характеристики удовлетворённости профилем подготовки в приведённых уравнениях являются внешними по отношению к содержанию образовательной услуги. Однако в данном случае можно утверждать, что интегративный результат удовлетворённости профилем подготовки в значительной мере определяется интересностью и доступностью содержания образовательных программ. А для удовлетворённости изучением конкретных дисциплин важную роль играют процессуальные характеристики.

Можно допустить существование и других моделей, особенно при изменении исходного комплекса характеристик образовательной услуги. Практическая полезность построенных моделей, их соответствие реальной образовательной практике открывают дополнительные возможности её совершенствования в соответствии с выявленными соотношениями. Аналогичные

регрессионные модели были построены для разных выборок с учётом формы обучения и вуза. Как оказалось, при изменении условий (выборки) величина коэффициентов уравнений незначительно меняется, но вид зависимости остаётся прежней. Поэтому данные соотношения можно рассматривать как общие тенденции взаимодействия факторов, связанных с разными подсистемами в системе показателей удовлетворённости.

Тогда суть соответствующей мягкой модели будет заключаться в следующем: чем выше удовлетворённость содержанием отдельной образовательной программы (программы учебной дисциплины), тем выше удовлетворённость в целом профилем подготовки. Это означает, что причинные отношения во всей выборочной совокупности рассматриваются как мягкие гипотетические конструкты общего характера. При детализации условий (спецификации выборки) они конкретизируются и становятся жёсткими моделями.

Заметим, что на этапе формирования совокупности исходных показателей не все причины могут быть в полной мере учтены. Однако получение адекватных математических моделей, отражающих практически все исходные параметры, а также их качественная интерпретация свидетельствуют о том, что существенные факторы учтены.

Общие модели причинных связей служат ориентиром для совершенствования практики, раскрывая направления целесообразной вариации индекса удовлетворённости. Действительно, оценки удовлетворённости потребителя могут существенно различаться для разных их категорий в зависимости от предпочтений. Поэтому необходим анализ вариации индекса удовлетворённости образовательной услугой в целом и для отдельных её свойств. В результате могут быть определены наиболее и наименее благополучные дисциплины в плане удовлетворённости потребителей по всем выделенным показателям, а также свойства образовательной услуги, требующие коррекции. Принципиальным для поставщика услуги является достижение высокой удовлетворённости потребителя. Очевидно, что сложность и специфика образовательной услуги вынуждает определять некие

приоритеты во взаимодействии с потребителями. Их достаточно аргументированно отражает полученная мягкая модель.

Ориентация на простоту мягких моделей, с одной стороны, упрощает их интерпретацию и делает удобными для практического применения. С другой стороны, наиболее простыми являются линейные модели, которые, как правило, на небольшом ограниченном участке изменения независимых переменных, могут приближённо заменять нелинейную модель. Отсюда противоречие: ограниченность описания социальной реальности с помощью линейных моделей не соответствует сути обобщения взаимосвязи класса жёстких моделей.

Поясним это на примере, учитывая, что мягкие модели, так же как и жёсткие, не обязательно являются линейными. Нередко встречаются ситуации, когда линейные модели адекватны, с точки зрения, математических критериев, но не имеют целесообразной содержательной интерпретации. В выполненных нами исследованиях взаимосвязей показателей удовлетворённости исполнением услуги и оценками её важности потребителями получены линейные и нелинейные (квадратичные) модели в разных выборках. А для общей выборки адекватной оказалась линейная модель (она могла быть и нелинейной). В данном случае возникает необходимость кроме этой общей содержательно интерпретируемой мягкой модели рассматривать статистически более точные жёсткие модели в отдельных выборках. Хотя и доминирует общая линейная тенденция, но она слишком упрощает ситуацию, т.к. особенности каждой выборки, которые привели к разным моделям, могут представлять самостоятельный интерес.

Следует заметить, что математические модели служат аналитическим представлением причинных связей, которые уже определены, поскольку одни переменные (независимые) рассматриваются как факторы (причины), а другие – зависимые переменные — выступают как их следствия. Поэтому любая модель представляет собой некий результат научного исследования, связанного с поиском причинных отношений в социальной системе. Сама по себе логика этого поиска, в частности, с применением

комплекса статистических методов, заслуживает отдельного рассмотрения.

Таким образом, исследование причинности на основе математического моделирования имеет аспектный характер и эффективно в определённых границах, устанавливаемых исследователем, исходя из содержательной постановки задачи. Но даже в этих границах экстраполяция не только выявленных количественных соотношений, но и обобщающих их качественных тенденций представляет теоретический и практический интерес. Открываются перспективы расширения возможностей перехода от простейшей формы математизации научного знания, связанной с количественным анализом и количественной формулировкой качественно установленных фактов, характерной для социально-педагогических исследований, к её более развитой форме – построению специальных математических моделей. Причём специфика образовательных систем делает необходимым использование целесообразного сочетания мягких и жёстких моделей, которое, следуя логике развития современной науки, важно рассматривать с позиции исследования причинности. □