

Учет шумового воздействия в кадастровой оценке жилой недвижимости

Научная статья

Учет шумового воздействия в кадастровой оценке жилой недвижимости

Аннотация

Шумовое воздействие является пространственно неоднородным внешним фактором, который может капитализироваться в ценах жилой недвижимости и одновременно иметь последствия для здоровья населения. Цель статьи состояла в систематизации научных подходов к учету транспортного шума при кадастровой оценке и определении элементов, пригодных для литература-ориентированного аналитического дизайна. Исследование выполнено на основе тематического синтеза публикаций о гедонической оценке, пространственном моделировании, массовой оценке, машинном обучении и нематериальном ущербе. Установлено, что связь шума с ценами жилья зависит от типа воздействия, пространственного и временного контекста, характеристик объекта и способа измерения экспозиции. Гедонические модели обеспечивают интерпретируемое описание капитализации внешнего эффекта, тогда как машинное обучение может повышать точность прогнозирования, но не заменяет анализ причинных и пространственных механизмов. Медицинские результаты остаются неоднородными, а интеграция динамического распределения транспортных потоков с прогнозированием шума и кадастровыми процедурами разработана недостаточно. Практическое применение результатов требует пространственно детализированного измерения шума, локальной валидации и явного представления неопределенности.

Ключевые слова: кадастровая оценка; жилой фонд; транспортный шум; гедоническая модель; массовая оценка; пространственная неоднородность; машинное обучение

1. Введение

Шумовое воздействие относится к числу внешних характеристик городской среды, которые могут отражаться в поведении участников рынка недвижимости. Для кадастровой оценки это означает необходимость учитывать не только физические и функциональные параметры объекта, но и качество окружающей среды в его пространственном контексте. Исследования цен жилья выявляют отрицательную связь между дорожным шумом и стоимостью жилых объектов, включая отдельно стоящие дома. В пространственно-временном гедоническом анализе такая связь сохраняется при учете неоднородности районов и периодов наблюдения, тогда как исследование стоимости односемейных домов связывает сильный транспортный шум с существенным снижением рыночной стоимости [1][2].

Экономическая капитализация шума представляет собой не механическое уменьшение цены на фиксированную величину, а результат взаимодействия характеристик объекта, доступности, структуры рынка и воспринимаемого качества среды. Гедонический подход позволяет оценивать, каким образом экологические характеристики включаются в цену недвижимости, однако надежность такой оценки зависит от теоретических предпосылок модели и корректного измерения факторов спроса [3]. В частности, простое расстояние до городского центра может недостаточно отражать пространственную структуру занятости. Показатели, учитывающие несколько центров занятости, доступность рабочих мест и изменение этой доступности, в ряде гедонических моделей описывают местоположение лучше, чем моноцентрические индикаторы [4].

Метод измерения шумового воздействия имеет принципиальное значение для переноса результатов в кадастровую практику. Среднее расстояние до источника шума не отражает рельеф, застройку, экранирование, направление распространения звука и локальную интенсивность транспортного потока. Пространственно детализированное моделирование распространения шума позволяет уменьшить ошибку измерения воздействия, а локальные регрессии показывают, что связь между шумом и ценами может изменяться между районами и во времени [1]. Аналогичная логика используется при учете других характеристик среды: например, гедоническая модель с индексом визуальной доступной уличной зелени продемонстрировала возможность количественного описания пространственно наблюдаемых экологических благ [5].



Рисунок 1. Метод измерения шумового воздействия имеет принципиальное значение для переноса результатов в кадастровую практику. Среднее расстояние до источника шума не отражает рельеф, застройку, экранирование, направление распространения звука и локальную интенсивность транспортного потока. (AI-generated illustration)

Значимость шумового фактора не исчерпывается ценовыми последствиями. Обобщение исследований окружающего шума связывает его воздействие с раздражением, стрессом, нарушением сна, ухудшением когнитивных функций и сердечно-сосудистыми рисками [6]. Однако отдельные эпидемиологические результаты требуют осторожной интерпре-

тации. В когортном исследовании дорожный шум был связан с небольшим повышением систолического артериального давления, причем величина связи различалась между подгруппами, но четкой связи с диастолическим давлением и впервые возникшей самостоятельно сообщенной гипертонией обнаружено не было [7]. Следовательно, медицинские последствия могут обосновывать общественную значимость проблемы, но не позволяют автоматически преобразовывать любой уровень шума в единый денежный коэффициент кадастровой корректировки.

Современная массовая оценка сочетает интерпретируемые регрессионные модели с алгоритмами, способными учитывать нелинейность и сложные взаимодействия признаков. В исследовании массовой оценки жилья в Южной Корее случайный лес обеспечил более точные прогнозы, чем модель на основе метода наименьших квадратов, однако перенос таких результатов на другой рынок требует проверки состава признаков, временного периода и пространственной структуры данных [8]. Сравнение методов обновления гедонической оценки также показывает компромисс между точностью и стабильностью прогнозов: градиентный бустинг обеспечивал наивысшую точность, а робастная регрессия — наименьшую волатильность [9].

Таким образом, состояние вопроса включает три взаимосвязанных направления: оценку капитализации шума в ценах и арендной плате, пространственно-гедоническое моделирование воздействия и учет социально-экологических последствий. Цель настоящей статьи состояла в систематизации этих подходов и определении того, какие их элементы могут быть перенесены в литература-ориентированный дизайн кадастровой оценки жилой недвижимости. Для сопоставления ключевых направлений использована доказательная таблица (Table 1).

Table 1. Основные направления оценки шумового воздействия и их результаты

Критерий воздействия	Метод оценки	Тип результата
Дорожный и транспортный шум	Гедоническая модель цен, пространственно-временная регрессия	Оценка связи уровня шума с ценами жилья и пространственной неоднородности эффекта [1][2]
Локальные негативные характеристики среды	Гедоническая модель арендной стоимости	Изменение арендной платы в зависимости от расстояния до неблагоприятного объекта [10]
Социально-экологические последствия	Эпидемиологические модели и оценка нематериального ущерба	Связь с показателями здоровья и субъективным благополучием [7][11]
Массовая оценка	Регрессия, случайный лес, градиентный бустинг	Сравнение точности, устойчивости и интерпретируемости прогнозов [8][9]

2. Материалы и методы

2.1. Дизайн исследования и материал анализа

Исследование было выполнено как литература-ориентированный анализ. Материалом послужили научные публикации, посвященные кадастровой и гедонической оценке жи-

лой недвижимости, моделированию дорожного, железнодорожного и авиационного шума, пространственной неоднородности ценовых эффектов, массовой оценке и денежной оценке нематериального ущерба. Собственные измерения шумовой нагрузки, наблюдения за сделками, административные массивы и расчетные таблицы автора в исследовании не использовались.

В анализ включались публикации, в которых шум или иной локальный негативный фактор рассматривался через стоимость, арендную плату, показатели здоровья, субъективное благополучие либо методологию массовой оценки. Единицей анализа являлась публикация и описанный в ней методический результат. Для каждой работы фиксировались тип воздействия, объект оценки, единица наблюдения, пространственно-временной масштаб, способ измерения шума, модель и характер результата. Отдельно отмечались числовые оценки, границы применимости, признаки пространственной или временной неоднородности и сведения о неопределенности.

2.2. Тематическое кодирование и сопоставление методов

Публикации кодировались по пяти тематическим блокам: капитализация шумового воздействия в стоимости или арендной плате; пространственная детализация измерения; регрессионные и гедонические модели; алгоритмы машинного обучения для массовой оценки; социально-экологические и нематериальные последствия. Внутри каждого блока результаты сопоставлялись описательно, без объединения количественных оценок из исследований с различными рынками, единицами измерения, типами шума и целевыми переменными.

Для оценки применимости к массовой кадастровой оценке использовались четыре критерия: способность измерять воздействие на уровне объекта или малой территории, интерпретируемость связи между шумом и стоимостью, устойчивость к пространственно-временной неоднородности и возможность представления неопределенности. Гедонические модели рассматривались как инструменты объяснения ценового эффекта, а алгоритмы машинного обучения — как инструменты прогнозирования, способные дополнять, но не заменять содержательную интерпретацию факторов стоимости.

При анализе временной структуры учитывалась необходимость отделять краткосрочные эффекты от сезонных и долгосрочных закономерностей, моделировать изменяющиеся во времени смешивающие факторы и лаговые связи. Для соответствующих задач методологически необходимы описательное исследование, проверка модели и анализ чувствительности [12]. Неопределенность прогнозов рассматривалась как самостоятельный результат, а не только как характеристика ошибки среднего значения; методы конформного прогнозирования, например, предназначены для построения интервалов правдоподобных цен при контроле точности [13].

3. Результаты

3.1. Связь шумового воздействия со стоимостью жилья

Тематический синтез выявил устойчивое направление исследований, в котором дорожный шум рассматривается как фактор, связанный со снижением цен жилой недвижимости. В анализе рынка индивидуальных домов сильный транспортный шум соответствовал предполагаемому общему снижению стоимости на 30%. В качестве иллюстрации приводилась оценка, согласно которой дом стоимостью 975 000 шведских крон мог бы продаваться примерно за 650 000 шведских крон рядом с дорогой с высоким уровнем шума [2]. Данная оценка относится к конкретному рынку и модели и не может непосредственно использоваться как универсальный кадастровый коэффициент.

Другие гедонические исследования показывают, что отрицательные характеристики среды могут капитализироваться не только в ценах сделок, но и в арендной стоимости. В исследовании жилой недвижимости Исламабада объекты рядом с трущобами сдавались примерно на 10% дешевле сопоставимых объектов, расположенных дальше; в полулогарифмической модели на расстоянии 1 км от неблагоприятного объекта арендная стоимость увеличивалась примерно на 12,40%, а на расстоянии 500 м была почти на 10% выше, чем непосредственно рядом с ним [10]. Эти результаты относятся к иному типу локального воздействия и показывают не величину эффекта шума, а чувствительность арендной стоимости к пространственной близости неблагоприятного фактора.

Величина ценового эффекта изменялась в зависимости от пространственного и временного контекста. Исследование на основе более 40 000 сделок с индивидуальными жилыми домами в агломерации Сент-Пола за 2005–2010 годы было специально ориентировано на оценку связи между шумом и ценами, а пространственно и временно гибкие локальные регрессии выявили нестационарность этой связи между районами и периодами [1]. Следовательно, одинаковый уровень шума не обязательно соответствует одинаковой ценовой корректировке на разных участках рынка.

3.2. Социально-экологические последствия и нематериальный ущерб

Медицинские результаты были неоднородными по исходам и группам населения. В когортном исследовании 57 053 взрослых в возрасте 50–64 лет повышение дорожного шума на каждые 10 дБ(А) было связано с увеличением систолического артериального давления на 0,26 мм рт. ст. Связь была сильнее у мужчин — 0,59 мм рт. ст. — и у более пожилых участников — 0,65 мм рт. ст. на каждые 10 дБ(А) [7].

Одновременно в том же исследовании дорожный шум не был связан с диастолическим давлением или впервые возникшей самостоятельно сообщенной гипертонией за 5,3 года наблюдения. Для железнодорожного шума выше 60 дБ предполагаемое повышение риска гипертонии на 8% не достигло статистической значимости, поскольку доверительный интервал включал отсутствие связи [7]. Тем самым результаты различались в зависимости от типа шума, показателя здоровья, периода наблюдения и анализируемой подгруппы.

Для последствий, которые не имеют непосредственного рыночного выражения, использовались методы условной оценки и оценки удовлетворенности жизнью. Условная оценка позволяет получать денежную оценку общественных благ при отсутствии наблюдаемых цен и уменьшает риск неявного приписывания неколичественным последствиям нулевой или бесконечной стоимости [14]. В исследованиях авиационного шума различия цен на жилье дополнялись оценкой остаточного ущерба с использованием опросов об удовлетворенности жизнью; размер компенсации зависел от объективного уровня шума, дохода домохозяйства и наличия шумоизоляции [11].

3.3. Сопоставление моделей массовой оценки

Гедонические модели обеспечивали интерпретируемое описание капитализации внешних эффектов, поскольку позволяли связать цену с характеристиками объекта, местоположением и экологическим фактором. Однако результат зависел от корректности предположений и от того, насколько модель учитывала децентрализацию занятости, различия районов и доступность рабочих мест [3][4]. Для шумового воздействия это означает необходимость совместного учета уровня экспозиции, доступности, характеристик застройки и иных локальных факторов.

В исследовании массовой оценки квартир в Каннаме за 2006–2017 годы 72% прогнозов случайного леса находились в пределах 5% от фактических цен, тогда как аналогичный порог достигался примерно для 17,5% прогнозов модели на основе метода наименьших

квадратов. Среднее процентное отклонение составило около 5,5% для случайного леса и почти 20% для модели наименьших квадратов [8]. Эти показатели описывают результаты конкретного рынка и не подтверждают автоматическое превосходство алгоритма при переносе на другую территорию.

При сравнении шести методов оценки и двух стратегий временных окон на данных более 123 000 продаж частных домов в Швейцарии за 2005–2017 годы градиентный бустинг обеспечил наивысшую точность прогнозов, а робастная регрессия — наименьшую волатильность. Различие между скользящим и расширяющимся временным окном влияло на результаты умеренно [9]. Таким образом, прогнозная точность и стабильность оказались различными критериями качества.

Table 2. Сравнение методов, используемых при оценке шумового воздействия и стоимости недвижимости

Метод	Тип данных	Оцениваемый эффект	Ограничение
Гедоническая модель	Цены сделок, характеристики объектов и среды	Капитализация шумового воздействия в цене	Зависимость от теоретических предпосылок и спецификации модели [3]
Локальная регрессия	Пространственно и временно привязанные сделки	Неоднородность эффекта между районами и периодами	Ограниченная переносимость локальных оценок [1]
Случайный лес	Массив сделок и многочисленные признаки	Прогнозная точность при нелинейных связях	Меньшая содержательная интерпретируемость и зависимость от обучающего массива [8]
Градиентный бустинг	Большие массивы продаж с временным обновлением	Точность обновления оценки	Компромисс между точностью и стабильностью прогноза [9]
Условная оценка и опросы благополучия	Опросные данные и показатели субъективного благополучия	Нематериальный ущерб без наблюдаемой рыночной цены	Зависимость от формулировки вопросов, дохода и субъективных оценок [14][11]

Сопоставление результатов показало также недостаточную разработанность связи между транспортным моделированием и прогнозированием шума. Модели динамического распределения транспортных потоков способны формировать более реалистичные данные для оценки экологического воздействия, однако их интеграция с моделями транспортного шума остается перспективным, но недостаточно разработанным направлением [15].

4. Обсуждение

4.1. Шум как пространственно-временный фактор стоимости

Результаты синтеза не поддерживают представление о шуме как об универсальном единичном поправочном коэффициенте. Ценовой эффект формируется в конкретном пространственном контексте и зависит от того, как измеряется экспозиция, какие характеристики объекта контролируются и насколько однороден рынок. Пространственно детализированное моделирование распространения шума позволяет уменьшить ошибку измерения, а локальные регрессии показывают, что сама связь между шумом и ценой изменяется по территории и во времени [1]. Для кадастровой оценки это означает, что одинаковая нормативная поправка может скрывать различия между фасадом, дворовой территорией, этажностью, экранированием и интенсивностью движения.

Интерпретируемая гедоническая модель остается необходимой для объяснения того, каким образом шум капитализируется в стоимости. Ее применение требует одновременно учета доступности, структуры занятости и других экологических характеристик. Исследования городского расположения показывают, что показатели, основанные на доступности рабочих мест и нескольких центрах занятости, могут превосходить простое расстояние до центра [4]. Следовательно, оценка шумового воздействия должна отделять собственно дискомфорт от ценовой премии или скидки, связанной с доступностью и иными преимуществами местоположения.

Машинное обучение способно дополнить гедонические модели там, где взаимодействия факторов нелинейны и трудно задаются заранее. Однако более высокая точность прогноза не тождественна лучшему объяснению ценового эффекта. Случайный лес и градиентный бустинг могут улучшить прогноз, тогда как локальные и гедонические модели дают более прозрачную интерпретацию пространственной зависимости. Поэтому для массовой оценки рациональна последовательность, при которой интерпретируемая модель используется для анализа механизма, а алгоритмическая модель — для проверки и повышения прогностической точности.

4.2. Таксономия методов для массовой кадастровой оценки

Сопоставление методов по измерению воздействия, пространственной детализации, интерпретируемости и пригодности для массовой оценки представлено в Table 3. Пространственная детализация относится к способности метода различать объекты и участки с неодинаковой шумовой нагрузкой; интерпретируемость — к возможности связать результат с конкретным фактором стоимости; пригодность для массовой оценки — к масштабируемости при сохранении контроля качества.

Table 3. Таксономическая матрица методов

Методический класс	Измерение воздействия	Пространственная детализация	Интерпретируемость	Пригодность для массовой оценки
Гедоническая регрессия	Непрерывный уровень шума и контрольные признаки	Средняя или высокая при наличии локальных данных	Высокая	Высокая при устойчивой спецификации

Методический класс	Измерение воздействия	Пространственная детализация	Интерпретируемость	Пригодность для массовой оценки
Пространственно-временная локальная регрессия	Локальные показатели шума и сделок	Высокая	Средняя или высокая	Средняя из-за требований к плотности наблюдений [1]
Случайный лес и градиентный бустинг	Многомерный набор признаков	Зависит от пространственной структуры обучающих данных	Ниже, чем у регрессионных моделей	Высокая при наличии большого массива сделок [8][9]
Конформное прогнозирование	Прогноз стоимости и характеристики неопределенности	Зависит от структуры исходных признаков	Средняя	Высокая как средство интервальной оценки [13]
Условная оценка и оценка благополучия	Субъективное восприятие и нематериальные потери	Зависит от дизайна опроса	Средняя	Дополнительная, а не основная при массовой оценке [11][14]

4.3. Ограничения доказательной базы и исследовательский пробел

Основное ограничение синтеза связано с неоднородностью рынков, типов шума и целевых показателей. Исследования дорожного, железнодорожного и авиационного шума используют разные шкалы воздействия, пространственные единицы и периоды наблюдения. Поэтому количественные результаты нельзя объединять в единую универсальную зависимость без повторной оценки на общей территории и при сопоставимой спецификации модели. Аналогично, результаты исследования локального негативного фактора в Исламабаде не могут быть обобщены на все регионы и типы неблагоприятных объектов [10].

Временная структура создает дополнительный источник неопределенности. Краткосрочные изменения транспортной нагрузки, сезонность, долгосрочная динамика цен и изменение характеристик застройки могут смешиваться в одной оценке. Для их разделения необходимы временные ряды, модели изменяющихся во времени смешивающих факторов, лаговых связей и чувствительности результатов к выбору временного окна [12]. Без такой проверки наблюдаемая связь может отражать не только воздействие шума, но и изменение транспортной доступности, реконструкцию улиц или иные процессы городской трансформации.

Медицинские результаты также нельзя непосредственно переводить в денежные поправки к кадастровой стоимости. Они подтверждают общественную значимость шумового воздействия, но различаются по исходам, подгруппам и дизайну исследования. Наличие связи с систолическим давлением при отсутствии четкой связи с гипертонией показывает, что выводы должны формулироваться для конкретного показателя и периода наблюдения, а не распространяться на здоровье населения в целом [7].

Наиболее конкретный исследовательский пробел связан с интеграцией динамических моделей распределения транспортных потоков, прогнозирования шума и кадастровых

процедур. Динамическое распределение способно давать более реалистичное представление о транспортной нагрузке, однако связь этого результата с пространственной картой шума и последующей оценкой объектов разработана недостаточно [15]. Для проверки такого подхода потребуются геокодированные характеристики объектов и сделок, детальная модель распространения шума, данные о транспортных потоках во времени, признаки экранирования и застройки, а также независимая процедура проверки прогнозов и интервальной неопределенности.

5. Заключение

Литература-ориентированный анализ показал, что учет шумового воздействия в кадастровой оценке должен опираться на сочетание трех компонентов: пространственно детализированного измерения экспозиции, моделей капитализации внешних эффектов и явного анализа неопределенности. Гедонические и локальные регрессионные модели позволяют объяснять неоднородность ценовой реакции, а методы машинного обучения могут использоваться для повышения прогностической точности при сохранении независимой проверки и интерпретации результатов.

Практическая ценность проведенного синтеза состоит в формулировании методических ориентиров для последующего исследования конкретного рынка. Вместе с тем представленные количественные оценки относятся к отдельным территориям, рынкам и типам воздействия. Поэтому окончательные выводы о кадастровой стоимости объектов возможны только после добавления локальных данных о сделках, пространственно-временных параметров шума, характеристик застройки и процедуры валидации прогнозов.

6. Дополнительные сведения

Вклад авторов: Авторы сформулировали проблему, разработали литература-ориентированный дизайн, выполнили систематизацию и анализ публикаций и подготовили рукопись.

Финансирование: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

Доступность данных: В статье использованы опубликованные научные материалы; собственный набор данных для исследования не формировался.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Раскрытие использования искусственного интеллекта: Текст рукописи подготовлен с помощью инструмента искусственного интеллекта на основе материалов исследования; авторы проверили и отредактировали содержание и несут полную ответственность за опубликованный текст.

Список литературы

1. Aaron Swoboda, Tsegaye Nega, Maxwell Timm. HEDONIC ANALYSIS OVER TIME AND SPACE: THE CASE OF HOUSE PRICES AND TRAFFIC NOISE. *Journal of Regional Science*. 2015. SCID: 54.1/3d8rw6gf.
2. Mats Wilhelmsson. The Impact of Traffic Noise on the Values of Single-family Houses. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2000. SCID: 54.1/s9pkde52.
3. Anna Freeman. Hedonic Prices, Property Values and Measuring Environmental Benefits: A Survey of the Issues. Palgrave Macmillan UK eBooks. 1981. SCID: 54.1/6yhab4bx.
4. John R. Ottensmann, Seth Payton, Joyce Y. Man. Urban Location and Housing Prices within a Hedonic Model. *RePEc: Research Papers in Economics*. 2008. SCID: 54.1/mbh58q9t.

5. Yonglin Zhang, Rencai Dong. Impacts of Street-Visible Greenery on Housing Prices: Evidence from a Hedonic Price Model and a Massive Street View Image Dataset in Beijing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. SCID: 54.1/cxnmkdua.
6. Thomas Münzel, Frank P. Schmidt, Sebastian Steven, Johannes Herzog, Andreas Daiber, Mette Sørensen. Environmental Noise and the Cardiovascular System. *Journal of the American College of Cardiology*. 2018. SCID: 54.1/m64xed63.
7. Mette Sørensen, Martin Hvidberg, Barbara Hoffmann, Zorana Jovanovic Andersen, Rikke Baastrup Nordsborg, Kenneth G. Lillelund, Jørgen Jakobsen, Anne Tjønneland, Kim Overvad, Ole Raaschou-Nielsen. Exposure to road traffic and railway noise and associations with blood pressure and self-reported hypertension: a cohort study. *Environmental Health*. 2011. SCID: 54.1/t44azz9a.
8. Jengei Hong, Heeyoul Choi, Woosung Kim. A HOUSE PRICE VALUATION BASED ON THE RANDOM FOREST APPROACH: THE MASS APPRAISAL OF RESIDENTIAL PROPERTY IN SOUTH KOREA. *International Journal of Strategic Property Management*. 2020. SCID: 54.1/vs7a9k2k.
9. Michael Mayer, Steven C. Bourassa, Martin Hoesli, Donato Scognamiglio. Estimation and updating methods for hedonic valuation. *Journal of European real estate research*. 2019. SCID: 54.1/fgar7jjj.
10. Touseef Hussain, Jaffar Abbas, Zou Wei, Mohammad Nurunnabi. The Effect of Sustainable Urban Planning and Slum Disamenity on The Value of Neighboring Residential Property: Application of The Hedonic Pricing Model in Rent Price Appraisal. *Sustainability*. 2019. SCID: 54.1/w233muk7.
11. Bernard M. S. van Praag, B. Baarsma. Using Happiness Surveys to Value Intangibles: The Case of Airport Noise. *The Economic Journal*. 2004. SCID: 54.1/8a5hxm8c.
12. Krishnan Bhaskaran, Antonio Gasparrini, Shakoob Hajat, Liam Smeeth, Ben Armstrong. Time series regression studies in environmental epidemiology. *International Journal of Epidemiology*. 2013. SCID: 54.1/ja3pqddz.
13. Anthony Bellotti. Reliable region predictions for automated valuation models. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 2017. SCID: 54.1/k7qrq9xe.
14. Richard T. Carson. Contingent Valuation: A Practical Alternative when Prices Aren't Available. *The Journal of Economic Perspectives*. 2012. SCID: 54.1/665e5ct8.
15. Yi Wang, W.Y. Szeto, Han Ke, Terry L. Friesz. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B Methodological*. 2018. SCID: 54.1/er9t8zk7.