



Дмитрий Павлюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АЭРОПОРТОВ ЕВРОПЫ НА ОСНОВЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО
ГРАНИЧНОГО АНАЛИЗА**

Автореферат промоционной работы
на соискание научной степени доктора инженерных наук
(Dr.sc.ing.)

Научная область «Транспорт»
Научная подобласть «Телематика и логистика»

Научный консультант
Dr.sc.ing., профессор
Андронов А.М.

RIGA – 2015

UDK 519.2:656

П-125

Институт транспорта и связи

Павлюк Д.

П-125 Исследование эффективности аэропортов Европы на основе пространственного стохастического граничного анализа: Автореферат промоционной работы. Рига: Институт транспорта и связи, 2015.

В представленном материале сохранен авторский стиль и оформление.

ISBN 978-9984-818-75-7

© Pavlyuk Dmitry, 2015
© Transport and Telecommunication Institute, 2015

**ДИССЕРТАЦИОННАЯ РАБОТА ПРЕДСТАВЛЕНА В
ИНСТИТУТЕ ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ НА СОИСКАНИЕ
НАУЧНОЙ СТЕПЕНИ – ДОКТОР ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК
(Dr.Sc.Ing.)**

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Защита диссертационной работы состоится _____, 2015 в__:_ часов в Промоционном Совете Института транспорта и связи на соискание ученой степени доктора инженерных наук по адресу: Латвия, Рига, ул.Ломоносова 1, конференц-зал 130, тел. +371 67100594, fax: +371 67100535.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Я подтверждаю, что выполнил диссертационную работу, которая представлена на рассмотрение в Институт транспорта и связи на соискание научной степени доктора инженерных наук (Dr.sc.ing.). Данная диссертационная работа ранее не представлялась на рассмотрение в другие промоционные советы.

_____, 2015

Павлюк Д.В.

Диссертационная работа написана на английском языке, состоит из введения, 4 глав и заключения, включает в себя 23 рисунка, 27 таблиц, 156 страниц и 18 приложений. Список использованной литературы включает в себя 271 наименование.

Содержание

АННОТАЦИЯ	5
1. АКТУАЛЬНОСТЬ И МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	6
2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	7
3. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЕ	8
4. СТЕПЕНЬ НАУЧНОЙ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ	8
5. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
6. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
7. НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ.....	11
8. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	12
9. АПРОБАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
10. СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ	12
11. ТЕЗИСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ	14
12. ОБЗОР ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
12.1. Методологии оценивания эффективности аэропортов и их практическое использование при наличии пространственных эффектов.....	15
12.2. Стохастический граничный анализ и проблема моделирования пространственных эффектов	22
12.3. Пространственная модель стохастической границы и оценивание ее параметров.....	27
12.4. Эмпирический пространственный анализ аэропортов Европы.....	34
13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
14. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА	48

АННОТАЦИЯ

Промоционная работа Павлюка Дмитрия Вячеславовича „Исследование эффективности аэропортов Европы на основе пространственного стохастического граничного анализа”. Научный консультант Dr.sc.ing., профессор А.М. Андронов.

Основной целью исследования является разработка методологии оценивания эффективности с учетом влияния пространственных эффектов и применения данной методологии к практическому анализу эффективности аэропортов Европы.

В работе представлен обзор современных методов оценивания эффективности, учитывающих наличие пространственных эффектов, и существующих исследований эффективности работы аэропортов. Автором предложена пространственная стохастическая граничная модель, включающая различные типы пространственных эффектов. В работе представлена общая формализация предложенной модели, а также несколько практически важных частных случаев.

Диссертация содержит подробное описание предложенного автором метода оценивания коэффициентов пространственной модели производственной границы, основанного на принципе максимального правдоподобия. Основу метода составляет полученный закон распределения составного случайного члена модели, являющийся частным случаем многомерного замкнутого скошенного нормального распределения.

Процедуры оценивания реализованы в виде программного пакета *spfrontier* для среды R, доступного в официальном публичном архиве CRAN. Валидация разработанных процедур осуществлялась на основе серии статистических экспериментов и реальных наборов данных.

В работе проведено практическое исследование пространственных эффектов в 4 наборах данных: объединенная выборка аэропортов Европы и отдельные выборки аэропортов Испании, Великобритании и Греции. Исследование включает в себя статистическое тестирование пространственной автокорреляции между показателями частной производительности аэропортов, а также анализ наличия пространственных эффектов путем оценивания различных спецификаций предложенной пространственной модели стохастической производственной границы.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ И МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1997 году завершился основной этап законодательного процесса, направленного на либерализацию европейского рынка воздушных перевозок. Данный процесс привел к усилению конкуренции на рынке, затронувшей управление аэропортами и спровоцировавшей серьезные изменения в их организации и формах собственности. Компании-авиаперевозчики, действующие в условиях конкуренции, получили возможность выбирать обслуживающие их аэропорты, что также ускорило изменения в аэропортовой отрасли. Данные изменения вынудили аэропорты, исторически действовавшие как естественные монополии, приспособиваться к новым конкурентным рыночным условиям. Развитие скоростных железнодорожных и автобусных перевозок и общее улучшение транспортной инфраструктуры Европы также увеличило мобильность населения при выборе аэропорта и стало ещё одним фактором усиливающейся конкуренции.

Конкурентные условия деятельности обуславливают строгие требования к эффективности работы участников рынка. Большинство аэропортов, управляемых государством, было вовлечено в процесс приватизации с целью привлечения инвестиций и повышения операционной эффективности. Начиная с 1987 г., когда правительство Великобритании инициировало приватизацию семи крупнейших аэропортов, многие европейские аэропорты перешли к частично или полностью частной форме собственности. После приватизации одной из основных целей управления аэропортами стала максимизация прибыли, естественная для коммерческой деятельности. В результате данных изменений операционная эффективность аэропортов, являющаяся одним из основных источников повышения прибыльности, стала важным предметом исследования.

Оценивание эффективности аэропортов является важным компонентом управления и представляет интерес для различных участников рынка:

- для управляющих аэропортами компаний, которые могут использовать значения и динамику эффективности аэропортов для принятия решения и улучшения конкурентного положения;
- для компаний-авиаперевозчиков, заинтересованных в идентификации эффективных аэропортов при выборе партнеров;
- для региональных органов власти, которым необходимы эффективно работающие аэропорты для увеличения делового и туристического пассажиропотока в регионе;
- для государственных органов власти с целью контроля над программами развития аэропортов и принятия решений о распределении субсидий.

В настоящее время существует целый ряд общенаучных подходов к оцениванию эффективности, основанных на композитных индексах и понятии производственной границы. Применение данных подходов к анализу эффективности аэропортов имеет свои специфические сложности, некоторые

из которых связаны с наличием пространственных эффектов разного типа. Широко признанными пространственными эффектами в аэропортовой отрасли являются пространственная неоднородность и пространственная взаимосвязь.

Эффект пространственной неоднородности обуславливается неравномерным географическим распределением факторов, взаимосвязанных с эффективностью аэропортов. Данные факторы включают в себя климат, экономическое окружение, законодательство, мобильность населения и оказывают существенное влияние на результаты деятельности аэропорта. Учет пространственной неоднородности является необходимым условием сравнительного анализа эффективности аэропортов.

Второй тип пространственных эффектов, пространственная взаимосвязь, отражает взаимодействие между расположенными рядом аэропортами. В основном данный тип взаимодействия объясняется пространственной конкуренцией между аэропортами за различные ресурсы: пассажирские и грузовые потоки, обслуживаемые авиалинии, трудовые ресурсы. Конкуренция между аэропортами, даже в идеальных с точки зрения законодательства конкурентных условиях, сильно ограничена их географическим положением и очевидно имеет пространственный характер. Идентификация данного эффекта усиливается его неравномерностью. Хотя количество аэропортов существенно увеличилось в течение последних двух десятилетий, в Европе все ещё существует ряд регионов с малой плотностью аэропортов, в которых пространственная конкуренция является слабой или полностью отсутствует. Государственные органы власти часто пытаются компенсировать недостаточность конкуренции в данных регионах через различные формы регулирования. Неравномерность пространственной конкуренции приводит к существенным проблемам при ее оценивании.

С развитием конкурентного рынка и увеличением количество аэропортов важность пространственных эффектов между аэропортами Европы в ближайшем будущем возрастет. В настоящий момент наблюдается недостаток теоретических и эмпирических исследований эффективности аэропортов, в которых пространственные эффекты являются частью методологии. Применение современных принципов пространственной эконометрики является обоснованным решением и позволит улучшить методологию оценивания эффективности аэропортов.

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью данного исследования является разработка методологии статистического оценивания эффективности при наличии пространственных эффектов и применение данной методологии к анализу аэропортов Европы. Для достижения данной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. рассмотреть существующие статистические методы анализа эффективности и их приложения к аэропортовой отрасли, уделяя

особое внимание подходам к оцениванию пространственных эффектов;

2. предложить спецификацию статистической модели для оценивания эффективности, включающую пространственные эффекты в явном виде;
3. разработать метод оценивания параметров предложенной модели;
4. разработать программное обеспечение, реализующее метод оценивания параметров предложенной модели и необходимые дополнительные процедуры;
5. протестировать статистические свойства предложенного метода оценивания, используя методы статистического моделирования;
6. провести валидацию предложенной модели на основе реальных данных;
7. провести комплексный анализ эффективности аэропортов Европы, используя существующие методы пространственной статистики и предложенную статистическую модель.

3. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЕ

Объектом исследования является система аэропортов Европы.

Предметом исследования является статистическое оценивание эффективности аэропортов Европы с учетом пространственных эффектов.

4. СТЕПЕНЬ НАУЧНОЙ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

Данное исследование посвящено включению пространственных эффектов в методологию статистического оценивания эффективности аэропортов. Место данного исследования в методологической и прикладной иерархии представлено на Рис. 1.

Серьезные научные усилия были приложены исследователями с начала 1980-х г.г. к разработке подходов к оцениванию эффективности аэропортов. Возросший спрос на исследования был вызван процессом дерегулирования аэропортовой отрасли и привел к появлению большого числа научных и прикладных исследований. В течение последнего десятилетия было опубликовано более 100 работ, посвященных статистическому оцениванию эффективности аэропортов. Наиболее значительный вклад в разработку данной темы внесли Graham, Gillen и Lall, Barros, Gitto и Mancuso, Liebert. Было опубликовано несколько значимых отчетов исследовательских организаций: Global Airport Performance Benchmarking Reports (2003-2011), Airport Performance Indicators and Review of Airport Charges reports (2011-2013), Airport Service Quality programme (2006-2015). Также отчеты об исследовании эффективности аэропортов были представлены несколькими государственными комиссиями европейских стран.

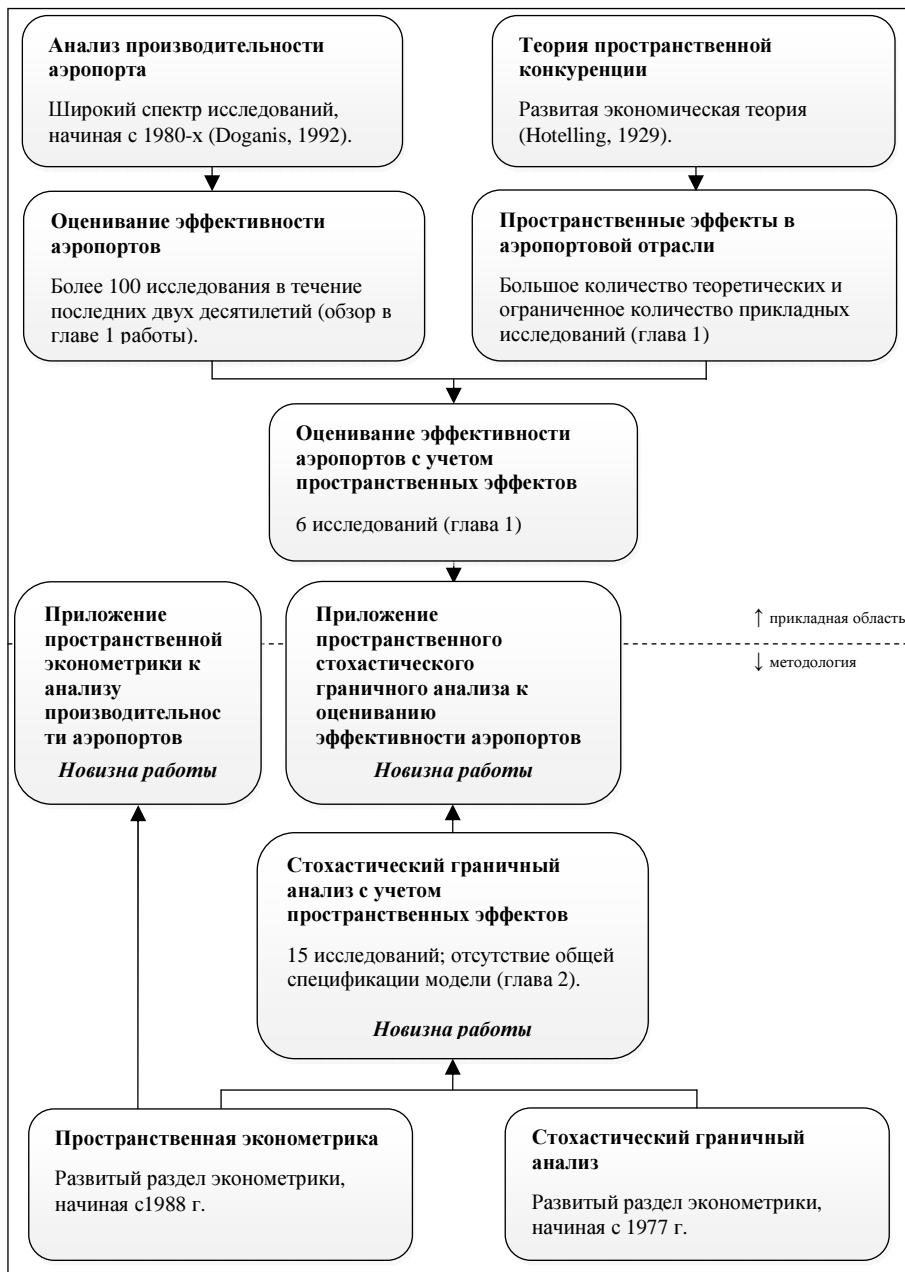


Рис. 1. Место диссертационной работы в системе исследований аэропортов

Для оценивания продуктивности и эффективности работы аэропортов применяется ряд методологий: индексы частной факторной продуктивности (ЧФП), анализ среды функционирования (АСФ), стохастический граничный анализ (СГА). СГА является методологической основой данного исследования и основан на эконометрическом подходе к построению производственной границы и оцениванию эффективности. Основным преимуществом СГА является статистический подход к оцениванию, позволяющий применять широкий спектр стандартных статистических процедур, таких как проверка гипотез и построение доверительных интервалов. Список исследований эффективности аэропортов, основанных на СГА, включает в себя работы Pels (2003), Abrate and Erbetta (2007), Jing (2007), Barros (2008), Martin and Voltes (2009), Muller (2009), Malighetti, Martini(2009) и Scotti (2012).

Несмотря на большое количество исследований, посвященных оцениванию эффективности аэропортов, пространственные эффекты редко являются предметом анализа. Среди небольшого числа исследований, учитывающих пространственные эффекты, можно отметить работы Borins и Advani (2002), Jing (2007), Malighetti (2010) и Scotti (2011), Adler и Liebert (2011). С технической точки зрения пространственные эффекты могут быть включены в статистическую модель разными способами. Пространственная неоднородность обычно моделируется путем включения в модель наблюдаемых факторов, таких как среднегодовая температура в регионе или действующий режим государственного регулирования. Пространственная взаимосвязь между смежными аэропортами часто моделируется на основе пересечения зон обслуживания аэропортов или субъективных оценок управляющего персонала. В то же время, для оценивания пространственных эффектов могут быть применены более универсальные и хорошо разработанные методы пространственной эконометрики.

Пространственная эконометрика представляет собой совокупность методов моделирования пространственных взаимосвязей. Данный подход, позволяющий включить эффекты пространственной неоднородности и взаимосвязи в регрессионный анализ, часто используется на практике. Несмотря на практическую распространенность пространственной эконометрики, единственным известным нам подобным исследованием эффективности аэропортов является Ulku (2014).

Включение принципов пространственной эконометрики в стохастический граничный анализ является недостаточно разработанной теоретической областью. Полный список известных нам исследований данной тематики включает в себя работы Druska и Horrace (2004), Fahr и Sunde (2005), Barrios (2007), Schettini (2007), Affuso (2010), Lin(2010), Areal(2010), Tonini и Pede (2011), Mastromarco (2012), Glass (2013), Fusco и Vidoli (2013). Все приведенные исследования рассматривают только один пространственный эффект, поэтому общая спецификация модели

стохастической границы с одновременным включением всех пространственных эффектов является необходимой.

5. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе проведенного анализа литературы, были сформулированы следующие проблемы исследования:

1. Наблюдается возрастающая важность пространственных эффектов в аэропортовой отрасли, однако в настоящее время данные эффекты редко учитываются при оценивании эффективности аэропортов.
2. Методология оценивания эффективности при наличии пространственных эффектов является недостаточно развитой.

6. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическая база данного исследования включает в себя теорию вероятностей, математическую статистику и эконометрический анализ. В частности, для спецификации и оценивания предлагаемой модели были использованы принципы пространственной эконометрики и стохастического граничного анализа. Также в работе были использованы методы статистического моделирования случайных величин для проверки статистических свойств предложенного метода оценивания.

Для реализации предложенного метода оценивания и прикладного статистического анализа была использовано программное обеспечение R. Программные инструменты, использованные в рамках исследования, также включают в себя реляционную СУБД MySQL для организации хранения данных и разработанные на языке Java вспомогательные процедуры для сбора и предварительной обработки данных.

7. НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Научная новизна исследования заключается в:

1. Предложенной пространственной стохастической граничной (ПСГ) модели, основанной на принципах пространственной эконометрики и стохастического граничного анализа. Данная модель позволяет оценивать параметры производственной границы, а также индивидуальные значения эффективности с учетом пространственных эффектов. В модель включено 4 различных типа пространственных эффектов: эндогенные и экзогенные пространственные эффекты, пространственная неоднородность и пространственная взаимосвязь значений эффективности.
2. Разработанным методе оценивания предложенной ПСГ модели. Метод оценивания основывается на принципе максимального правдоподобия и позволяет получить параметры производственной границы и индивидуальные значения эффективности. Валидация разработанных методов была выполнена на основе серии экспериментов статистического моделирования и на основе реальных данных.

3. Проведенном статистическом исследовании пространственных взаимосвязей между аэропортами Европы, выполненном на основе предложенной ПСГ модели. Данное исследование является первым систематическим использованием принципов пространственной эконометрики для анализа эффективности аэропортов. Разработанные спецификация модели и полученные результаты являются важным компонентом научной новизны данного исследования.

8. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Практическая ценность данного исследования заключается в:

1. Разработанном программном обеспечении *spfrontier*, реализующем разработанный метод оценивания предложенной ПСГ модели. Данное программное обеспечение реализовано в виде пакета для среды R и принято в официальном публичном архиве CRAN. Пакет включает в себя процедуры для оценивания параметров границы ПСГ модели, индивидуальных значений эффективности, численного оценивания гесса полученных оценок, статистического тестирования гипотез, а также код для реализованной серии статистических экспериментов. Данный пакет может быть использован для оценивания эффективности в области транспорта, региональной экономике, в анализе жилищного и сельского хозяйства, экологических исследованиях и других прикладных областях со значимыми пространственными эффектами
2. Результатах пространственного анализа аэропортов Европы. В данной работе был проведен анализ 4 реальных наборов данных, представляющих различные экономическое окружение и пространственную структуру: аэропорты Испании, Великобритании, Греции и объединенная выборка аэропортов Европы. Полученные результаты представляют практическую ценность для управления аэропортами, а также для принятия решений на уровне муниципальных властей и государства.

9. АПРОБАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты данного исследования были представлены на 8 научных и научно-практических конференциях в Латвии, Польше и России. Также автором получен ряд полезных комментариев относительно разработанного пакета *spfrontier* от научного сообщества.

10. СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 18 приложений. Работа включает 156 страниц, 23 иллюстрации и 27 таблиц. Список информационных источников включает 271 наименование.

Во *введении* работы представлена актуальность и мотивация исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы

цель и задачи исследования и представлена научная новизна и практическая ценность исследования.

Первая глава работы содержит критический обзор существующих исследований, посвященных эффективности работы аэропортов. Рассмотрены существующие методологии оценивания эффективности и проведен анализ их применения к аэропортовой отрасли. Особое внимание уделено подходам к обнаружению пространственных эффектов, в частности – пространственной неоднородности и взаимосвязи. В главе представлена теоретическая основа пространственного взаимодействия между аэропортами и проанализированы существующие исследования пространственных эффектов в аэропортовой отрасли.

Вторая глава работы содержит обзор основных концепций теории производства и стохастической граничной (СГ) модели как современного подхода к статистическому анализу теории. В главе представлена математическая формализация задачи построения производственной границы и оценивания эффективности. Были сформулированы однопродуктовая и многопродуктовая спецификации границы и рассмотрены эконометрические методы оценивания их параметров. Особое внимание в главе уделено существующим подходам к включению пространственных эффектов в СГ модель.

Третья глава содержит подробное описание предложенной автором ПСГ модели. Представлены различные типы пространственных эффектов и рассмотрены предпосылки их появления в различных прикладных областях. Сформулирована спецификация ПСГ модели, включающая в явном виде 4 рассмотренных типа пространственных эффектов. Глава содержит формальное обоснование разработанного метода оценивания параметров производственной границы ПСГ модели и индивидуальных значений эффективности. Приведены результаты серии экспериментов статистического моделирования, разработанной для проверки статистических свойств предложенного метода. Также глава содержит описание разработанного пакета *spfrontier*, реализующего все предложенные процедуры оценивания.

Четвертая глава посвящена статистическому анализу пространственных эффектов в 4 выборках аэропортов Европы. Проведенный анализ включает в себя статистическое тестирование гипотез о пространственной автокорреляции между значениями ЧФП индексов аэропортов, а также оценивание отдельных типов пространственных эффектов с помощью различных спецификаций ПСГ модели. Исследуемые наборы данных включают в себя объединенную выборку аэропортов Европы (359 аэропортов, 2008-2012 г.г.) и отдельные выборки аэропортов Испании (38 аэропортов, 2009-2010 г.г.), Великобритании (48 аэропортов, 2011-2012 г.г.) и Греции (42 аэропорта, 2007 г.). Глава содержит описание всех наборов данных и их источников, а также подробное описание результатов анализа

каждой отдельной выборки. Заключение и выводы в отдельности представлены по каждому набору данных.

Заключение содержит основные результаты работы и направления для дальнейших научных исследований.

11. ТЕЗИСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

На защиту выносятся следующие тезисы:

- Предложенная ПСГ модель, в явном виде включающая пространственные эффекты, может быть использована для оценивания эффективности при наличии следующих типов эффектов: эндогенные пространственные эффекты (пространственная взаимосвязь), экзогенные пространственные эффекты, пространственно коррелированные случайные компоненты (пространственная неоднородность) и пространственно взаимосвязанные значения эффективности.
- Разработанный метод оценивания может быть использован для оценивания параметров производственной границы предложенной ПСГ модели, а также индивидуальных значений эффективности. Применимость метода подтверждается серией численных статистических экспериментов.
- Разработанный программный пакет *spfrontier*, реализующий разработанные процедуры оценивания, может быть использован для прикладного пространственного анализа на основе ПСГ модели. Пакет *spfrontier* включает в себя процедуры для оценивания параметров границы ПСГ модели, индивидуальных значений эффективности, численного оценивания гессиана полученных оценок, статистического тестирования гипотез, а также код для реализованной серии статистических экспериментов. Кроме того, пакет включает в себя все наборы данных по аэропортам Европы, использованные в данном исследовании.
- Результаты эмпирического пространственного анализа аэропортов Европы содержат значительный компонент новизны и представляют практическую ценность. Проанализированные наборы данных включают в себя объединенную выборку аэропортов Европы, выборку аэропортов Испании, выборку аэропортов Великобритании и выборку аэропортов Греции. На основе предложенной ПСГ модели для каждой из выборок было исследовано наличие пространственных эффектов и проведено оценивание значений эффективности аэропортов.

12. ОБЗОР ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

12.1. Методологии оценивания эффективности аэропортов и их практическое использование при наличии пространственных эффектов

Согласно классическому определению, экономическая эффективность представляет собой использование доступных ресурсов для максимизации производимого объема товаров и услуг. Спецификация используемых ресурсов и результатов работы является важным этапом оценивания эффективности аэропорта. Данная спецификация является сложной практической задачей вследствие неоднородности деятельности аэропортов. На практике используются два наиболее распространенных подхода:

- коммерческий – аэропорт рассматривается как коммерческая организация;
- посреднический – аэропорт рассматривается как посредник между авиаперевозчиками и населением/грузами.

При рассмотрении аэропорта как коммерческой организации результат его деятельности может быть определен в виде дохода или прибыли. Данная спецификация является достаточно удобной для определения экономической эффективности аэропортов, но, тем не менее, имеет ряд недостатков. Деятельность аэропорта не ограничивается авиационными услугами и включает в себя обслуживание парковки, торговлю, услуги питания и другие услуги. В настоящее время неавиационные услуги играют для аэропортов важную роль и могут рассматриваться как основные наряду с авиационными услугами. Соотношение между авиационными и неавиационными услугами сильно варьируется для аэропортов Европы, что создает проблемы при их сравнительном анализе. Следует отметить, что сравнимость исследуемых объектов является важным условием для всех методик оценивания эффективности, рассмотренных в данной главе.

Посреднический подход к деятельности аэропорта требует другой спецификации результатов его работы. С точки зрения авиаперевозчиков, основной результат работы аэропорта измеряется количеством обслуженных взлетов-посадок самолетов (air transport movements, ATM). С точки зрения населения, результатами работы аэропорта могут служить количество обслуженных пассажиров (PAX) и объем грузов. Часто данные результаты объединяются в искусственный индикатор WLU (work load units) для упрощения сравнения аэропортов.

Спецификация ресурсов, используемых аэропортом, является более стандартной, но также имеет свои особенности. Классическим набором экономических ресурсов является труд, земля и капитал. Трудовые ресурсы аэропорта, как правило, представляются в виде количества сотрудников или эквивалента полной занятости. Капитальные ресурсы включают в себя объекты инфраструктуры: взлетно-посадочные полосы, терминалы, посадочные ворота, места стоянки самолетов, багажные ленты и др. Объекты

инфраструктуры обычно измеряются физическими показателями (количество, площадь, длина) и используются по отдельности, однако возможно и их объединение в виде финансовых показателей амортизации. Заправка и обслуживание самолетов, страхование и другие операционные ресурсы также часто используются в финансовой форме. Географическое местоположение аэропорта (расстояние до ближайших городов, численность населения в зоне обслуживания аэропорта, транспортная инфраструктура) может быть классифицировано как земельный ресурс.

Так как спецификация используемых ресурсов и результатов работы аэропорта является разнородной, исследователями выбирается наиболее подходящий с точки зрения исследования подход. Таблица 1 содержит обобщение ресурсов и результатов работы аэропортов, используемых в прикладных исследованиях (полный список исследований с используемыми ресурсами и результатами работы приведен в приложении диссертации).

Таблица 1.

Ресурсы и результаты работы аэропорта, используемые в существующих прикладных исследованиях

<i>Используемые ресурсы аэропорта</i>		<i>Результаты работы аэропорта</i>	
<i>Индикатор</i>	<i>Кол-во исследований (из 96)</i>	<i>Индикатор</i>	<i>Кол-во исследований (из 96)</i>
Трудовые ресурсы	48	Количество обслуженных пассажиров, PAX	75
Терминалы (площадь)	45	Количество обслуженных взлетов-посадок, АТМ	74
Операционные издержки	36	Объем обслуженных грузов	56
Взлетно-посадочные полосы (количество)	32	Неавиационные доходы	20
Взлетно-посадочные полосы (длина)	17	Авиационные доходы	19
Багажные ленты (количество)	16	WLU	5
Стойки регистрации (количество)	16	Общие доходы	5

Практически во всех рассмотренных исследованиях в качестве результата работы аэропорта использовались количества обслуженных пассажиров и взлетов-посадок (соответственно 75 и 74 из 96 исследований); большинство исследований также учитывает объем обслуженных грузов (56 исследований). При включении в модель финансовых индикаторов, исследователи обычно разделяют доходы аэропорта на авиационные и неавиационные. Прочие характеристики результатов работы аэропорта используются значительно реже.

Список показателей, отражающих использованные ресурсы аэропорта, является более разнообразным. Эквивалент полной занятости использовался в качестве показателя трудовых ресурсов в более чем половине

исследований. Выбранные показатели инфраструктурных ресурсов (взлетно-посадочные полосы, площадь терминалов и др.) сильно варьируются между исследованиями, однако необходимо заметить, что значения данных показателей являются очень сильно коррелированными, что делает возможным включение в модель только некоторых из них по выбору исследователя. Ещё одним популярным показателем ресурсов, используемым в 36 исследованиях из 96, являются операционные издержки. Ресурсы, связанные с географическим местоположением аэропортами, используются редко.

Важной аспектом прикладных исследований эффективности аэропортов является проблема доступности данных. Многие европейские аэропорты не предоставляют детальной статистики, в особенности – значений финансовых показателей. В случае если статистические данные доступны, используемые показатели часто не согласованы между собой по методике их сбора и учета, принятых в странах Европы. Проблема доступности данных имеет особое значение для пространственного анализа, так как пространственные модели требуют наличия данных по всем смежным аэропортам для идентификации пространственных взаимосвязей. Использование моделей пространственной эконометрики для данных с пропущенными значениями является недостаточно исследованным, поэтому наличие полного набора является крайне необходимым.

Методология оценивания эффективности

Теоретическая база оценивания эффективности включает в себя широкий спектр методов, обладающих своими преимуществами и недостатками. Научный подход к оцениванию эффективности аэропортов включает в себя как вычисление относительно простых линейных индексов, так и использование сложных моделей на основе производственной границы.

Наиболее простой одномерный подход к оцениванию эффективности заключается в вычислении отношений между выбранными показателями результата работы аэропорта и использованного ресурса. Индикаторы, построенные подобным образом, называются индексами частной факторной продуктивности (ЧФП). Вследствие большого разнообразия результатов работы и ресурсов аэропорта может быть построено большое количество индексов ЧФП. ЧФП индексы не отражают общую эффективность работы аэропорта, представляя лишь конкретный аспект его деятельности:

- Производительность трудовых ресурсов: количество обслуженных пассажиров/объем грузов/WLU на сотрудника аэропорта.
- Производительность инфраструктуры: количество обслуженных пассажиров/объем грузов/WLU на терминал, взлетно-посадочную полосу, квадратный метр полезной площади.
- Финансовые индексы: операционные издержки на WLU, общие/авиационные/неавиационные доходы на WLU.

- Индексы нежелательных результатов: время задержки на количество обслуженных пассажиров, объем вредных выбросов на количество обслуженных взлетов-посадок.

ЧФП индексы часто используются в управлении аэропортами благодаря простоте их расчетов и интерпретации. Вычисление отдельных значений ЧФП не требует наличия полного набора данных и может быть выполнено для отдельного аэропорта. ЧФП индексы предоставляют собой полезные показатели, относящиеся к отдельной операции, но их использование не позволяет получить полную картину деятельности аэропорта. ЧФП индексы, как правило, не учитывают такие факторы как разница цен на ресурсы и результаты работы и эффект замещения между ресурсами. Приведенные недостатки позволяют рассматривать ЧФП индексы лишь как полезный вспомогательный инструмент при оценивании эффективности аэропортов.

Недостатки индексов ЧФП привели к развитию методов, позволяющих получить агрегированные значения показателя эффективности. Существующие методологии могут быть классифицированы по использованному подходу (на основе среднего значения или на основе производственной границы) и по наличию случайного компонента (детерминированные и стохастические). Полученная классификация представлена в Таблица 2.

Таблица 2.

Классификация методов оценивания эффективности и производительности

	<i>Детерминированные</i>	<i>Стохастические</i>
<i>На основе среднего</i>	Совокупная факторная продуктивность, СФП (total productivity factor)	Классический регрессионный анализ
<i>На основе производственной границы</i>	Анализ среды функционирования, АСФ (data envelopment analysis)	Стохастический граничный анализ, СГА (stochastic frontier analysis)
	Анализ свободной оболочки (free disposal hull)	Метод без спецификации распределения (distribution-free approach) Анализ широкой границы (thick frontier approach)

Источник: классификация автора, основанная на работах Liebert и Niemeier (2011) и Hirschhausen и Culman (2005)

Методологии, основанные на среднем значении, позволяют оценить эффективность как отношение между взвешенными значениями результатов работы и взвешенными значениями использованных ресурсов. При построении СФП индексов в качестве весов используются цены ресурсов/результатов, а при использовании регрессионного анализа «веса» (коэффициенты регрессии) определяются путем минимизации суммы квадратов остатков. При использовании средних взвешенных значений

предполагается, что все аэропорты имеют одинаковый уровень эффективности использования ресурсов и возможные отклонения от среднего значения объясняются только случайными компонентами. Данное предположение не всегда удовлетворительно соответствует реальности – различие между двумя аэропортами, использующими сходные ресурсы, может быть объяснено не только случайным компонентом, но и различием в технической и управленческой эффективности их работы. Методологии, основанные на производственной границе (АСФ, СГА) учитывают наличие компонента неэффективности. АСФ является наиболее популярным подходом к оцениванию эффективности аэропортов. В течение последних 20 лет опубликовано более 100 исследований, посвященных эффективности аэропортов, основанных на АСФ.

Регрессионный анализ является наиболее распространенным статистическим подходом. Классическая модель регрессии основана на получении среднего значения и не включает возможную неэффективность работы в качестве отдельного компонента. Таким образом, регрессионная модель позволяет получить не эффективность, а продуктивность аэропортов.

Статистический подход к построению производственной границы и оцениванию эффективности привел к построению целого ряда моделей. СГА представляет собой один из наиболее популярных подходов данной группы. Основным преимуществом СГА является возможность одновременного оценивания параметров производственной границы и индивидуальных значений эффективности и применения стандартных статистических процедур. Данное преимущество требует обязательной спецификации функциональной формы производственной границы и закона распределения компонента неэффективности. Анализ литературных источников показывает, что наблюдается рост количества приложений СГА к оцениванию эффективности аэропортов. В то же время количество исследований, учитывающих неоднородность производственной границы, характерной для аэропортовой отрасли, является недостаточным.

Пространственная неоднородность в аэропортовой отрасли

Большинство подходов к оцениванию эффективности аэропортов основывается на сравнительном анализе. Эффективное применение данных подходов требует теоретической сравнимости (однородности) аэропортов выборки. На практике, деятельность аэропортов и окружающие их условия являются чрезвычайно неоднородными.

Неоднородность выборки аэропортов имеет многостороннее теоретическое обоснование. Данная проблема может быть вызвана такими факторами как размер аэропортов (существенные различия в бизнес-процессах крупных и мелких аэропортов), специализация трафика (пассажиры или грузовые местные или международные перевозки), форма собственности (частные и государственные аэропорты), режимы государственного регулирования, социальные и демографические

характеристики населения в зоне обслуживания. Факторы, определяющие неоднородность выборки аэропортов, как правило, делятся на эндогенные, контролируемые руководством аэропорта, и экзогенные, относящиеся к внешней среде аэропорта. Эндогенная неоднородность на практике часто рассматривается как проявление неэффективности работы аэропортов, в то время как экзогенные представляют собой препятствие для оценивания эффективности. Анализируя экзогенную неоднородность, Forsyth и Niemeier (2011) отметили, что «данная неоднородность является центральной проблемой оценивания эффективности аэропортов, которой необходимо уделять особое внимание». Важность экзогенной неоднородности при оценивании эффективности аэропортов является общепризнанной в литературе.

При моделировании деятельности аэропортов неоднородность (эндогенная и экзогенная) обычно классифицируется на наблюдаемую и ненаблюдаемую. Наблюдаемая неоднородность может быть представлена в модели, используя набор измеримых показателей. Например, данные о форме собственности аэропортов публично доступны и могут быть включены в модель через фиктивные переменные или переменные, отражающие доли собственников для более сложных структур владения. Наблюдаемая климатическая неоднородность может быть представлена как среднегодовая температура, среднегодовые осадки, средняя доля года со снежным покровом и т.д. Неоднородность, которая не может быть представлена непосредственно набором индикаторов, классифицируется как ненаблюдаемая. Barros(2008) и Liebert(2011) отмечают важность ненаблюдаемой неоднородности для оценивания эффективности аэропортов.

В данном исследовании основное внимание уделено пространственной неоднородности, связанной с географическим расположением аэропортов. Пространственная неоднородность основана на неравномерном распространении факторов, связанных с эффективностью, в рамках географической территории. Пространственная неоднородность может быть частично представлена в моделях наблюдаемыми факторами, однако неявное выявление ненаблюдаемых факторов так же является технически возможным. Главным допущением, позволяющим неявное включение неоднородности в спецификацию модели, является схожесть ненаблюдаемых пространственных эффектов для соседних аэропортов.

Основными причинами появления пространственной неоднородности в аэропортовой отрасли являются:

- Естественные причины: климат, ландшафт.
- Причины, связанные с источником трафика: демографические, экономические и социальные условия в зоне обслуживания аэропорта; особенности рынка труда; местная специфика.
- Причины, связанные с привлечением трафика: близлежащие места, привлекательные для туризма; логистические центры, порты и другие

транспортные узлы; транспортная инфраструктура; деловая активность населения в зоне обслуживания аэропорта.

- Административные и исторические причины: общее управление смежными аэропортами, общее или сходное местное законодательство, режим экономического регулирования.

Отметим, что указанные факторы влияют как на положение производственной границы, так и на эффективность работы аэропортов. Пространственная неоднородность производственной границы и пространственно взаимосвязанные значения эффективности рассматриваются в данном исследовании по отдельности.

Обобщая приведенные причины, можно заключить, что для аэропортовой отрасли характерна высокая степень пространственной неоднородности. Включение наблюдаемой и ненаблюдаемой пространственной неоднородности в различные подходы к оцениванию эффективности представляется необходимым и важным методологическим улучшением.

Пространственная взаимосвязь представляет собой ещё один тип пространственных эффектов. Данный эффект взаимосвязан с взаимодействием между соседними экономическими субъектами. Как и в случае с пространственной неоднородностью, наличие пространственной взаимосвязи определяется целым рядом причин, наиболее важной из которых является пространственная конкуренция. Теория пространственной конкуренции имеет хорошо разработанную базу и часто применяется на практике в различных отраслях. В то же время, эмпирическое оценивание пространственной конкуренции между аэропортами является недостаточно исследованной областью.

Основные выводы главы

В данной главе рассматриваются существующие подходы к оцениванию эффективности аэропортов. Особое внимание уделено исследованиям, связанным с анализом пространственных эффектов в аэропортовой отрасли и их взаимосвязей с эффективностью работы аэропортов. Характерными пространственными эффектами для аэропортовой отрасли являются пространственная неоднородность и пространственная взаимосвязь.

Пространственная неоднородность основывается на неравномерном географическом распределении факторов, взаимосвязанных с эффективностью аэропортов. Данные факторы, такие как климат, экономическое окружение, законодательство, могут оказывать существенное влияние на эффективность работы аэропортов.

Пространственная взаимосвязь представляет собой ещё один тип пространственных эффектов, отражающий взаимодействие между соседними аэропортами. Наличие пространственной взаимосвязи обосновывается целым

рядом причин; пространственная конкуренция является наиболее признанной для аэропортовой отрасли.

В заключение необходимо отметить, что взаимосвязь между пространственными эффектами и эффективностью аэропортов является недостаточно исследованной научной и практической проблемой.

12.2. Стохастический граничный анализ и проблема моделирования пространственных эффектов

Теоретические основы стохастического граничного анализа

В классической экономической науке процесс производства определяется как использование материальных и нематериальных ресурсов с целью получения готовой продукции или услуги. В данной главе мы будем рассматривать компанию (аэропорт) как производственный объект, который использует набор имеющихся ресурсов (входов) для производства набора товаров и услуг (выходы).

Обозначим объемы K видов используемых ресурсов как вектор $x=(x_1, x_2, \dots, x_K)$ и объемы M видов готовой продукции как вектор $y=(y_1, y_2, \dots, y_M)$. В этом случае процесс производства может быть определен как преобразование вектор x в вектор y . Технологические ограничения производства представляют собой набор пар значений векторов x и y , которые являются достижимыми в смысле возможности производства y при использовании ресурсов x . Данный набор пар хорошо известен как множество производственных возможностей и будет обозначаться как $PPS = \{x, y: x \text{ достаточен для производства } y\}$. Множество достижимых результатов производства при заданном векторе ресурсов x имеет вид:

$$P(x) = \{y: (x, y) \in PPS\}$$

Эффективность деятельности компании определяется в первую очередь целями деятельности. Наиболее часто используемыми на практике целями компании являются максимизация объемов готовой продукции y при заданном векторе ресурсов x (ориентация на выход) и минимизация объемов используемых ресурсов x при заданном векторе результатов (ориентация на вход). Эффективность, оцененная на основе данных подходов, принято называть технической. Также существует ряд альтернативных спецификаций цели: максимизация дохода или прибыли, минимизация издержек и др. В данной главе будет рассмотрен процесс с ориентацией на выход; формулировка задачи для других постановок цели является схожей.

Вектор результатов является технически эффективным тогда и только тогда, когда (определение Debreu-Farrell):

$$TE(x, y) = \left[\sup_{\theta} \{ \theta : \theta y \leq f(x) \} \right]^{-1} \quad (1)$$

Таким образом, значение технической эффективности равно 1 для компании, находящейся на границе производственных возможностей (производящей максимально возможный вектор результатов при заданном

векторе ресурсов). Компании, производящие объем продукции, который меньше максимально достижимого при используемом ими векторе ресурсов, квалифицируются как неэффективные.

Определение Debreu-Farell технической эффективности может быть представлено в форме уравнения:

$$y = f(x) \cdot TE(x, y) = f(x) \cdot \exp(-u), u \geq 0, \quad (2)$$

где

$f(x)$ – производственная функция;

u – величина, обратная к значению технической эффективности, часто называемая компонентом неэффективности.

На практике при определении производственной функции предполагается наличие также случайного компонента, который лежит в основе эконометрического анализа. Добавляя случайный компонент v в формулу (2), получим стохастическую граничную (СГ) модель:

$$y = f(x) \cdot \exp(v) \cdot \exp(-u) \quad (3)$$

Для эконометрического оценивания параметров данной модели, предполагаем наличие выборки из n компаний с индексами $i = 1, 2, \dots, n$. Значения результатов (y_i) и используемых ресурсов (x_i) должны быть доступны для каждой компании в выборке, а значения случайного компонента (v_i) и компонента неэффективности (u_i) являются ненаблюдаемыми. Предполагая, что производственная граница $f(x)$ является общей для всех компаний и зависит от вектора параметров β , получаем эконометрическую спецификацию СГ модели:

$$y_i = f(x_i, \beta) \cdot \exp(v_i) \cdot \exp(-u_i) \quad (4)$$

В представленной форме параметры модели может быть оценены, используя стандартные эконометрические методы. Набор используемых методов для оценивания параметров модели (4) достаточно широк. В случае, если известны законы распределения компонентов v и u , наиболее часто используемым методом оценивания является метод максимального правдоподобия (ММП). Данный метод использует информацию о законах распределения v и u и позволяет получить состоятельные и асимптотически эффективные оценки. ММП служит базой для данного исследования.

Элементы вектора v обычно рассматриваются как независимые и имеющие нормальное распределение с нулевым средним и постоянным стандартным отклонением σ_v .

Распределение элементов вектора неэффективности u может быть выбрано произвольно, с учетом их обязательной неотрицательности. В зависимости от выбранного закона распределения компонента неэффективности, различают спецификации СГ модели. После рассмотрения различных законов распределения неэффективности, было принято решение использовать усеченный нормальный закон как достаточно общий и удобный для использования на практике.

Таким образом, составной случайный компонент СГ модели (4) представляет собой разность случайных величин с нормальным и усеченным нормальным распределением: $\varepsilon_i = v_i - u_i$.

Функция плотности вероятности суммы нормального и усеченного нормального распределения хорошо известна. Результирующий закон распределения представлен Azzalini (1985) и имеет название расширенного скошенного нормального распределения.

Функция максимального правдоподобия для составного случайного члена СГ модели и выборки из n компаний представлена в литературе. Отметим, что случайный компонент и компонент неэффективности предполагаются независимыми друг от друга для одной компании, а также независимыми между компаниями.

Подходы к моделированию пространственных эффектов в СГА

Классическая спецификация СГ модели основана на предположении о независимости наблюдений в выборке. В рамках данного предположения, ресурсы компаний, результаты их работы и значения эффективности предполагаются невязанными. На практике данное предположение часто нарушается. Взаимосвязь между компаниями может быть обусловлена общим рынком, на котором работают компании, общим экономическим и политическим окружением, конкуренцией между компаниями и другими экономическими факторами. В некоторых случаях возможным подходом к обнаружению данных взаимосвязей является географическое местоположение компании, при этом взаимосвязи принято называть пространственными эффектами. Компании, расположенные рядом друг с другом, как правило, имеют более тесные связи, а также имеют схожую среду деятельности. Наличие пространственных эффектов нарушает предположение о независимости наблюдений, причем для СГ модели это нарушение можно разделить на следующие типы:

- Эндогенные пространственные эффекты представляют взаимосвязь между результатами работы компании и результатами соседних с ней компаний. Следует учесть, что пространственные эффекты являются асимметричными (влияние компании i на компанию j не совпадает с влиянием компании j на компанию i).
- Экзогенные пространственные эффекты представляют взаимосвязь между результатами работы компании и ресурсами, используемыми соседними компаниями.
- Пространственная неоднородность: деятельность соседних компаний может быть подвержена влиянию внешних факторов, специфичных для данной географической области.

Проблемы оценивания СГ модели, возникающие при наличии пространственных эффектов хорошо известны. Farrell (1957) разработал модель производственной границы для сельскохозяйственных компаний в США и отметил явные различия в значениях эффективности вследствие

влияния таких факторов как климат, местоположение и урожайность. Хотя проблема была обозначена, в дальнейшем она редко рассматривалась в исследованиях. Разделение неэффективности и неоднородности (различной природы) в СГ моделях стало объектом научного интереса только в течение последнего десятилетия. Отметим, что разделение неэффективности и неоднородности для данных временного среза и без дополнительных предположений о природе неоднородности является эконометрически невозможным.

Наиболее естественным и теоретически обоснованным предположением о неоднородности является ее пространственная структура. Неоднородность может объясняться параметрами пространства и в этом случае быть общей для всех соседних компаний, в то время как неэффективность представляет собой специфику компании. Пространственная неоднородность является возможной во многих реальных прикладных областях, и использование пространственной структуры позволит отделить данный тип неоднородности от эффективности компаний. Методологическая новизна данного исследования заключается в интеграции пространственных эффектов в СГА.

Сделанное заключение о необходимости включения пространственных эффектов в СГА поддерживается и большим числом прикладных областей, в которых наличие пространственных эффектов является общепризнанным. Как правило, пространственная структура не может быть полностью представлена наблюдаемыми факторами, поэтому одним из требований к модели является учет ненаблюдаемых пространственных эффектов.

Географическое местоположение компании представляют собой единственный источник информации о ненаблюдаемых пространственных эффектах. Известный закон Тоблера гласит, что «все вокруг взаимосвязано между собой, но вещи, расположенные рядом, взаимосвязаны сильнее». Таким образом, можно ожидать, что сила взаимодействия между компаниями уменьшается при увеличении расстояния между ними. Следует отметить, что определение термина «расстояние» может быть различным: физическим, экономическим, временным. Единственным требованием к значениям расстояния является его экзогенный характер, то есть определенность за пределами рассматриваемых моделей. Так как взаимосвязь между расстоянием и силой пространственных эффектов является обратной, то часто на практике рассматривается характеристика w_{ij} , обратная к расстоянию между компаниями i и j , называемая пространственным весом. Таким образом, для выборки из n компаний может быть построена матрица пространственной близости $W = \{w_{ij}\}_{n \times n}$.

Элементы на главной диагонали данной матрицы по определению установлены в 0 для исключения взаимосвязи объекта самого с собой. Общий пространственный эффект, оказываемый остальными компаниями выборки на компанию i , может быть представлен как взвешенная сумма показателей, называемая пространственным лагом:

$$[Wy]_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} Y_j \quad (5)$$

Таким образом, общая пространственная регрессионная модель может быть представлена в следующем виде:

$$Y = \rho_Y W_Y Y + X\beta + W_X X\beta^{(s)} + v, \quad (6)$$

$$v = \rho_v W_v v + \tilde{v},$$

где

W_Y, W_X, W_v – известные матрицы пространственной близости для эндогенных («результат-результат») и экзогенных («результат-ресурс») пространственных эффектов и для пространственной неоднородности («случайный компонент - случайный компонент») соответственно;

$\rho_Y, \beta^{(s)}, \rho_v$ – неизвестные параметры пространственных эффектов в выходах, входах и случайном компоненте модели;

\tilde{v} – вектор идентичных независимо распределенных симметричных случайных компонентов.

Согласно общей спецификации модели пространственной регрессии (6), результат работы u_i компании i определяется используемыми ею ресурсами, результатами работы и используемыми ресурсами соседних компаний и неоднородной окружающей средой.

Объединение принципов пространственной эконометрики и СГА является недостаточно разработанной областью эконометрической теории; обзор существующих исследований с включением пространственных эффектов в СГ модель приведен в тексте диссертации. Следует отметить, что оценивание подобных моделей представляет собой сложную математическую и техническую проблему. В рассмотренных работах каждый исследователь, предлагающий подход к включению пространственных эффектов в модель, вынужден разрабатывать и программное обеспечение для оценивания полученной модели. Очевидно, что отсутствие общедоступного программного обеспечения создает серьезные проблемы для практического применения разработанных моделей.

Основные выводы главы

В данной главе были представлены основы теории производственной границы и СГА. Основное внимание уделено существующим подходам к включению наблюдаемых и ненаблюдаемых пространственных эффектов в эконометрические модели. Были рассмотрены основные принципы раздела пространственной эконометрики, рассматривающей оценивание пространственных эффектов. Также был сделан обзор существующих подходов к объединению принципов пространственной эконометрики и СГА. Основные выводы, полученные на основе анализа литературы, имеют вид:

- Несмотря на важность пространственных эффектов для СГА, количество исследований, в которых учтены данные эффекты, является ограниченным. В большинстве исследований пространственные эффекты игнорируются или учитываются только через наблюдаемые факторы.
- Пространственная эконометрика и СГА являются хорошо развитыми разделами эконометрики, однако, системные исследования, объединяющие их принципы, практически отсутствуют. Отсутствует и общая спецификация СГ модели с пространственными эффектами, что приводит к появлению большого количества частных случаев, рассмотренных в различных исследованиях.
- Вследствие отсутствия общей спецификации СГ модели с пространственными эффектами, отсутствует и программное обеспечение для оценивания подобных моделей. Исследователи вынуждены разрабатывать свое программное обеспечение в виде пакетов, редко доступных для практического использования.

На основании представленных выводов была сформулирована задача разработки спецификации СГ модели с пространственными эффектами и методов ее оценивания. Также важным шагом к использованию данной модели на практике является разработка общедоступного программного обеспечения.

12.3. Пространственная модель стохастической границы и оценивание ее параметров

Формальная спецификация пространственной стохастической граничной (ПСГ) модели

В рамках СГ модели могут быть сформулирована гипотеза о важности следующих типов пространственных эффектов:

- Тип 1.* Эндогенные пространственные эффекты: взаимосвязь результатов работы аэропорта с результатами работы соседних аэропортов (пространственная взаимосвязь).
- Тип 2.* Экзогенные пространственные эффекты: взаимосвязь результатов работы аэропорта с ресурсами, используемыми соседними аэропортами
- Тип 3.* Пространственно коррелированные случайные компоненты: неравномерное географическое распределение факторов, влияющих на эффективность аэропортов (пространственная неоднородность)
- Тип 4.* Пространственно взаимосвязанная эффективность: взаимосвязь между значениями эффективности соседних аэропортов.

Предлагаемая общая спецификация пространственной стохастической граничной (ПСГ) модели, включающая в себя все 4 типа пространственных эффектов, имеет вид:

$$Y_i = \rho_Y \sum_{j=1}^n w_{Y,ij} Y_j + \sum_{k=1}^K X_{ki} \beta_k + \sum_{k=1}^K \left(\beta_k^{(s)} \sum_{j=1}^n w_{X,ij} X_{kj} \right) + v_i - u_i, \quad (7)$$

$$v_i = \rho_v \sum_{j=1}^n w_{v,ij} v_j + \tilde{v}_i, u_i = \rho_u \sum_{j=1}^n w_{u,ij} u_j + \tilde{u}_i,$$

где

i, j – индексы компаний, $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$,

Y_i – результат работы компании i ,

X_{ki} – ресурсы, используемые компанией $i, k = 1, \dots, K$,

$w_{Y,ij}, w_{X,ij}, w_{v,ij}$ и $w_{u,ij}$ – пространственные веса для эндогенных, экзогенных эффектов, пространственно коррелированных случайных компонентов и пространственной взаимосвязанной эффективности между компаниями i и j соответственно,

v_i и u_i – случайный компонент и компонент неэффективности соответственно, β_k – неизвестные параметры, определяющие непосредственный эффект от используемых ресурсов,

$\rho_Y, \beta_k^{(s)}, \rho_v$ и ρ_u – неизвестные коэффициенты, описывающие пространственные эффекты,

\tilde{v}_i и \tilde{u}_i – идентичные независимо распределенные случайные компоненты и компоненты неэффективности.

Группируя переменные модели в вектора по i, j и k , получаем спецификацию модели в матричной форме:

$$Y = \rho_Y W_Y Y + X \beta + W_X X \beta^{(s)} + v - u, \quad (8)$$

$$v = \rho_v W_v v + \tilde{v}, u = \rho_u W_u u + \tilde{u}.$$

С учетом возможных способов обобщения представленной модели, спецификация (8) может быть классифицирована как линейная стохастическая граничная модель с компонентами пространственной авторегрессии первого порядка для зависимой переменной, независимых переменных, случайного компонента и компонента неэффективности. Обозначим данную спецификацию как **SSF(1,1,1,1)**, где параметры в скобках представляют порядок авторегрессии для зависимой переменной, независимых переменных, случайного компонента и компонента неэффективности соответственно.

Методы оценивания, основанные на предположении независимости наблюдений выборки, позволяют получить состоятельные оценки параметров при отсутствии пространственных эффектов в реальном порождающем данные процессе (ПДП). Эндогенные и экзогенные пространственные эффекты и пространственно взаимосвязанные значения эффективности (типы 1, 2 и 4) в ПДП приводят к получению смещенных и несостоятельных оценок как для параметров производственной границы, так и для значений неэффективности. В свою очередь, пространственная неоднородность (тип 3)

приводят к получению неэффективных оценок параметров производственной границы и несостоятельных оценок индивидуальной эффективности. Так как оценивание технической эффективности является одной из основных целей СГА, то можно заключить, что наличие пространственных эффектов в ПДП не позволяет применять существующие процедуры оценивания. Таким образом, для оценивания СГ модели с пространственными эффектами необходима разработка специализированного метода оценивания. Необходимый метод был разработан в рамках данного исследования на основе принципа максимального правдоподобия.

Для применения ММП требуются предположения о законах распределения случайных компонентов модели. В данном исследовании были использованы нормальный закон распределения симметричного случайного компонента модели и усеченный нормальный закон распределения компонента неэффективности. При этом распределение составного случайного компонента ПСГ модели определяется Теоремой 1.

Теорема 1.

Пусть имеется две независимых многомерных случайных величины: $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, имеющая многомерное нормальное распределение с нулевым средним и матрицей ковариации $\Sigma_v, v \sim MVN(0_n, \Sigma_v)$, $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ имеющая многомерное усеченное нормальное распределение со средним μ , матрицей ковариации Σ_u и интервалом усечения $(0, +\infty), u \sim MVTN_{0,+\infty}(\mu, \Sigma_u)$.

Тогда n -мерная случайная величина $\varepsilon = v - u$ имеет замкнутое скошенное нормальное распределение:

$$\varepsilon \sim CSN_{n,n}(\mu', \Sigma', \Gamma', \nu', \Delta'), \quad (9)$$

где

$$\mu' = -\mu, \Sigma' = \Sigma_v + \Sigma_u, \Gamma' = -\Sigma_u(\Sigma_v + \Sigma_u)^{-1}, \nu' = -\mu, \Delta' = (\Sigma_v^{-1} + \Sigma_u^{-1})^{-1},$$

и функция плотности вероятности ε имеет вид:

$$f_\varepsilon(\varepsilon) = [\Phi_n(0, -\mu, \Sigma_u)]^{-1} \Phi_n\left(-\Sigma_u(\Sigma_v + \Sigma_u)^{-1}(\varepsilon + \mu), -\mu, (\Sigma_v^{-1} + \Sigma_u^{-1})^{-1}\right) \times \varphi_n(\varepsilon, -\mu, \Sigma_v + \Sigma_u), \quad (10)$$

где φ_n и Φ_n – функция плотности вероятности и функция распределения стандартного нормального закона.

Доказательство Теоремы 1 приведено в тексте диссертации.

Согласно Теореме 1, составной случайный компонент ПСГ модели имеет замкнутое скошенное нормальное распределение $CSN_{n,n}$ с указанными параметрами. Оценивание параметров CSN распределения является сложной

математической и вычислительной проблемой, недостаточно разработанной в настоящее время. Для заданной функции плотности вероятности, логарифмическая функция правдоподобия имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \ln L(\beta, \beta^{(s)}, \sigma_v^2, \sigma_u^2, \mu, \rho_y, \rho_v, \rho_u) &= -\ln \Phi_n(0, -\mu, \Sigma_u) + \\
 &+ \ln \Phi_n\left(-\Sigma_u (\Sigma_v + \Sigma_u)^{-1} (e + \mu), -\mu, (\Sigma_v^{-1} + \Sigma_u^{-1})^{-1}\right) + \\
 &+ \ln \varphi_n(e, -\mu, \Sigma_v + \Sigma_u), \\
 e &= Y - \rho_y W_y Y - X\beta - W_x X\beta^{(s)}, \\
 \Sigma_v &= \sigma_v^2 \left((I_n - \rho_v W_v)^{-1} \right)^T (I_n - \rho_v W_v)^{-1}, \\
 \Sigma_u &= \sigma_u^2 \left((I_n - \rho_u W_u)^{-1} \right)^T (I_n - \rho_u W_u)^{-1}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Максимизация логарифмической функции правдоподобия позволяет получить состоятельные оценки параметров распределения.

Второй важной задачей оценивания ПСГ модели является нахождение индивидуальных оценок эффективности u_i . ММП позволяет получить оценки составного случайного компонента ε_i , которые содержат информацию о компоненте неэффективности u_i . Для выделения информации об u_i может быть использовано условное распределение u_i при заданном значении ε_i . Вывод функции плотности условной вероятности приведен в тексте диссертации; полученный закон распределения является многомерным усеченным нормальным:

$$\begin{aligned}
 u|\varepsilon &\sim MVTN_{0,+\infty}(\mu_{u|\varepsilon}, \Sigma_{u|\varepsilon}) \\
 \text{где } \mu_{u|\varepsilon} &= \mu - \Sigma_u (\Sigma_v + \Sigma_u)^{-1} (\varepsilon + \mu), \Sigma_{u|\varepsilon} = (\Sigma_v^{-1} + \Sigma_u^{-1})^{-1}
 \end{aligned} \tag{12}$$

При известном законе условного распределения u вектор точечных оценок \hat{u} может быть получен как условное математическое ожидание. Теоретические моменты многомерного усеченного нормального распределения хорошо известны в литературе.

Реализация метода оценивания параметров ПСГ модели

Реализация предложенного метода оценивания параметров ПСГ модели требует использования целого ряда вычислительно сложных функций: функции плотности и распределения многомерного нормального и усеченного нормального закона, моменты многомерного усеченного нормального распределения, оптимизационные алгоритмы. Свободно распространяемое статистическое программное обеспечение R содержит пакеты для всех необходимых базовых функций, наличие которых стало основной причиной выбора R как среды для реализации метода оценивания.

Разработанный модуль, реализующий все необходимые функции и названный *spfrontier*, принят в официальном архиве CRAN (полный сетевой

архив R). Основной метод оценивания параметров ПСГ модели реализован в виде одноименной функции *spfrontier*, которая включает в себя набор алгоритмов, разработанных в данном исследовании. Результатом работы данной функции являются векторы оценок параметров распределения и их стандартных отклонений, численный гессиан оценок, вектор индивидуальных значений эффективности, вектор модельных значений зависимой переменной и вектор остатков.

Помимо функций, реализующих разработанные алгоритмы, пакет *spfrontier* содержит все наборы данных, использованные в данном исследовании, что обеспечивает воспроизводимость исследования.

Официальная документация пакета *spfrontier* и исходные коды доступны на сайте архива CRAN. Пакет также содержит примеры использования и тесты для валидации функций.

В данной главе также рассмотрен ряд критических моментов реализации предложенного метода:

- Процедура выбора начального вектора оценок, которая является важным этапом численной оптимизации многомерных невыпуклых функций.
- Репараметризация функции правдоподобия, необходимая для приведения ее к более гладкой и вычислительно более простой форме.
- Оценивание матрицы ковариации оценок параметров, необходимой для проверки статистических гипотез. Проблема оценивания данной матрицы, связанная с ре-параметризацией параметров, решена используя «сендвич-оценку» (sandwich estimator).

Валидация предложенного метода оценивания параметров ПСГ модели

Классическая СГ модель без пространственных эффектов может быть рассмотрена как частный случай предложенной ПСГ модели. Поэтому оценки параметров $SSF(0,0,0,0)$ модели, полученные с помощью предложенного метода, должны в точности соответствовать оценкам классической модели. Для сравнения результатов оценивания был использован популярный пакет *Frontier 4.1*. Оценки, полученные с помощью пакетов *frontier* и *spfrontier* для моделей с полуноральным и усеченным нормальным распределениями компонента неэффективности, полностью совпали.

Свойства предложенного метода оценивания для выборок малого объема исследовались с помощью серии статистических экспериментов типа Монте-Карло. Используемый ПДП описывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & DGP(\rho_Y^*, \rho_v^*, \rho_u^*, \mu^*): \\
 & Y^* = (I_n - \rho_Y^* W_Y)^{-1} \times \\
 & \quad \times \left(5 + 10 \log(X^*) + \log(X^*)^2 + (I_n - \rho_v^* W_v)^{-1} \tilde{v} - (I_n - \rho_u^* W_u)^{-1} \tilde{u} \right), \\
 & X^* \sim U(1, 10), \tilde{v} \sim N(0, 0.5^2), \tilde{u} \sim N(\mu^*, 2.5^2).
 \end{aligned} \tag{13}$$

Моделируемая производственная граница является монотонной и выпуклой на рассмотренном множестве входных параметров. Матрицы пространственной близости W_v , W_Y и W_u моделировались согласно принципам ладьи (rook-style) и ферзя (queen-style).

Список проведенных экспериментов имеет вид:

- SimE1: DGP(0,0,0,0), модель SSF(0,0,0,0), полунормальный
- SimE2: DGP(1,0,0,0), модель SSF(0,0,0,0), усеченный нормальный
- SimE3: DGP(0,0.2,0,0), модель SSF(1,0,0,0), полунормальный
- SimE3b: DGP(0,0.2,0,0), модель SSF(0,0,0,0), полунормальный
- SimE4: DGP(1,0.2,0,0), модель SSF(1,0,0,0), усеченный нормальный
- SimE5: DGP(0,0,0.4,0), модель SSF(0,0,1,0), полунормальный закон
- SimE5b: DGP(0,0,0.4,0), модель SSF(1,0,0,0), полунормальный
- SimE6: DGP(0,0,0,0.4), модель SSF(0,0,0,1), полунормальный
- SimE6b: DGP(0,0,0,0.4), модель SSF(1,0,0,0), полунормальный

Для каждого эксперимента проводилось 100 запусков для выборок из 50, 100, 200 и 300 наблюдений.

Качество метода оценивания оценивалось на основе следующих показателей: абсолютное и относительное смещение полученных оценок, стандартное отклонение и среднеквадратическая ошибка оценок, доверительные интервалы (для оценки состоятельности оценок) и ядерные оценки эмпирической функции плотности вероятности оценок.

Пространственно взаимосвязанные значения эффективности являются одним из наиболее важных аспектов данного исследования, поэтому особое внимание в тексте диссертации уделено эксперименту SimE6, включающему данный пространственный эффект в ПДП и в оцениваемую модель. В результате эксперимента были получены несмещенные и состоятельные оценки всех параметров ПДП. Стандартные отклонения получаемых оценок для выборки из 100 объектов являются достаточными для статистически значимой идентификации параметров модели и имеют существенно меньшие значения для выборок большего объема.

Графики эмпирических функций плотности вероятности для оценок параметров ρ_u и σ_u представлены на Рис. 2:

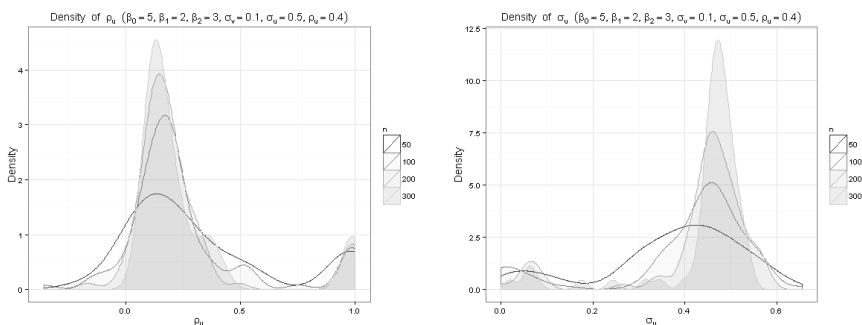


Рис. 2. Графики эмпирических функций плотности вероятности оценок параметров ρ_u и σ_u , полученных в эксперименте SimE6

Отметим значимый пик на функции плотности вероятности оценки параметра ρ_u , расположенный в районе значения 1, который приводит к обнаруженной смещенности оценки. Появление данного пика связано с базовой проблемой попадания в локальный оптимум алгоритмов численной оптимизации невыпуклой функции при отсутствии аналитического вектора градиента. Данная проблема не может быть решена полностью и обычные рекомендации ее решения заключаются в выборе подходящего начального решения для численного алгоритма. Разработанный пакет *spfrontier* поддерживает пользовательское определение начального решения, а также реализует автоматическую процедуру поиска начального решения по сетке. Также следует отметить, что данная проблема является менее значимой для выборок больших объемов (200 и 300 объектов). За исключением данной проблемы, полученные оценки обладают хорошими статистическими свойствами, и, следовательно, метод оценивания может быть эффективно использован для выборок достаточного объема. Для выборок малого объема рекомендуется использовать несколько начальных решений для инициализации алгоритма оптимизации.

Обобщая полученные результаты, можно отметить, что статистический эксперимент подтверждает начальные предположения:

- Разработанный метод оценивания позволяет получить несмещенные и состоятельные оценки для классической спецификации стохастической граничной модели без пространственных эффектов (эксперименты SimE1 и SimE2).
- Эндогенные пространственные эффекты могут быть идентифицированы для выборок малого объема (эксперименты SimE3 и SimE4); оценивание пространственно коррелированных случайных компонентов и пространственно взаимосвязанных значений эффективности требует выборок большего объема (эксперименты SimE5, SimE6).

- Отдельные параметры пространственной стохастической граничной модели являются слабо идентифицируемыми (эксперименты SimE2, SimE4, SimE5b и SimE6b).
- Рассмотренные типы пространственных эффектов могут быть значимо различены в рамках модели. Если в ПДП пространственно коррелированные ошибки присутствуют, но исключены из рассмотрения в модели, то они не распознаются моделью как эндогенные пространственные эффекты (эксперимент SimE5b). Подобным образом пространственно взаимосвязанные значения эффективности не идентифицируются как эндогенные пространственные эффекты (эксперимент SimE6b).

Основные выводы главы

Данная глава содержит подробное описание предложенной автором ПСГ модели. Были рассмотрены 4 типа пространственных эффектов: эндогенные и экзогенные пространственные эффекты, пространственная неоднородность и пространственно взаимосвязанные значения эффективности. В главе обоснована важность данных эффектов в различных прикладных областях и предложена спецификация модели, включающая все данные эффекты.

Важным практическим результатом данного исследования является предложенный метод оценивания параметров ПСГ модели. В работе был получен закон распределения составного случайного компонента ПСГ модели, являющийся частным случаем многомерного замкнутого скошенного нормального закона. На основе закона распределения случайного члена была построена функция правдоподобия. Также был представлен метод оценивания индивидуальных значений эффективности.

Разработанный метод оценивания реализован в виде пакета *spfrontier* для среды R. Данный пакет является компонентом практической ценности данного исследования. Глава содержит описание процедуры валидации разработанного метода оценивания и программного обеспечения. Процедура, основанная на проведении ряда статистических экспериментов, позволила сделать вывод о несмещенности и состоятельности получаемых оценок параметров модели.

12.4. Эмпирический пространственный анализ аэропортов Европы

Учитывая особенности статистических данных аэропортов, описанные в главе 1, были сформулированы следующие требования:

- Согласованность – использование общей методологии сбора данных для всех объектов выборки.
- Географическая полнота – наличие в выборке данных обо всех аэропортах региона.
- Доступность отдельных (не сгруппированных) данных по аэропортам.

Отсутствие открытой статистической информации по аэропортам Европы, удовлетворяющей представленным требованиям, привело к необходимости создания соответствующей базы данных в рамках данного исследования. Для заполнения базы данных использовалась только информация из публичных источников.

Данное исследование включает анализ 4 наборов данных:

- Объединенная выборка аэропортов Европы, 359 аэропортов, 2008-2012 г.г.
- Выборка аэропортов Испании, 38 аэропортов, 2009-2010 г.г.
- Выборка аэропортов Великобритании, 48 аэропортов, 2011-2012 г.г.
- Выборка аэропортов Греции, 42 аэропортов, 2007 г.

Все наборы данных доступны в составе пакета *spfrontier*, разработанного автором исследования.

Использование ЧФП индексов является одним из наиболее простых подходов к анализу эффективности аэропортов. ЧФП индексы, использованные в данном исследовании, были разделены на две группы – технические и экономические.

- Технические ЧФП индексы: ATM/PAX/WLU на взлетно-посадочную полосу, ATM/PAX/WLU на обслуживаемое направление, количество обслуженных пассажиров на душу населения в зоне 100 км вокруг аэропорта.
- Экономические ЧФП индексы: WLU на расходы на персонал; Доход на WLU/ATM; EBIDTA на WLU/ATM; EBIDTA на доход.

Экономические ЧФП индексы использовались для анализа аэропортов Испании и Великобритании, для которых доступны значения финансовых показателей.

Для оценивания эффективности аэропортов на основе производственной границы были использованы спецификации ПСГ модели, описанные в главе 3. Набор использованных спецификаций включает классическую регрессионную модель (МНК), модели пространственной авторегрессии (SAR) and пространственной ошибки (SEM), классическую СГ и частные случаи ПСГ модели с различными типами пространственных эффектов. Диаграмма наследования спецификаций модели представлена на Рис.3.

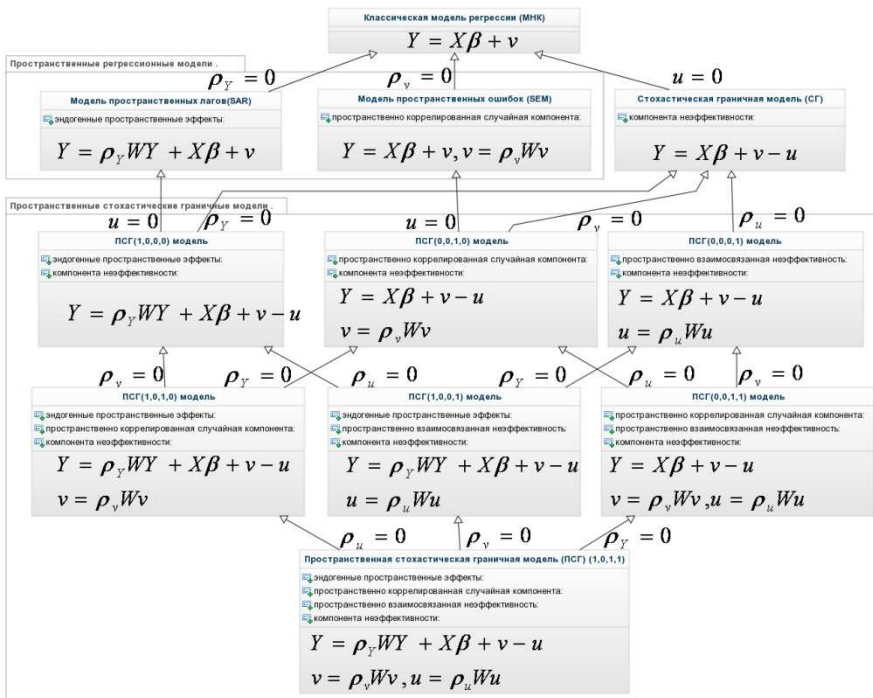


Рис.3. Диаграмма наследования спецификаций модели

Эмпирический анализ аэропортов Европы

Выборка включает данные по аэропортам Европы за 2008-2012 г.г. Данные получены из баз данных Eurostat и OpenFlights и содержат показатели трафика, обслуженного аэропортами и их инфраструктуры. Панель данных является несбалансированной.

Данная выборка не содержит финансовую информацию, поэтому ее исследование было ограничено посредническим подходом к деятельности аэропортов. Данные содержат информацию о большом количестве переменных, которые могут быть классифицированы как ресурсы аэропорта: количества взлетно-посадочных полос, стоек регистрации, посадочных ворот, парковочных мест. В рамках данного исследования в качестве переменной, отражающей инфраструктуру аэропорта, использовалось количество обслуживаемых направлений.

Основная цель исследования заключается в выявлении в данных пространственных эффектов. Таблица 3 содержит результаты статистического тестирования наличия пространственной автокорреляции между значениями ЧФП индексов аэропортов.

Таблица 3.

Пространственная автокорреляция значений ЧФП индексов аэропортов Европы

	Индекс Морана I		Индекс Джири С		Индекс Мантела	
	Коэф.	p- значение	Коэф.	p- значение	Коэф.	p- значение
ATM per Runway	0.001	0.578	1.088**	0.040	-0.08	0.982
WLU per Runway	0.003	0.491	1.096*	0.061	-0.082	0.980
PAX per Runway	0.003	0.491	1.096*	0.061	-0.082	0.982
ATM per Route	0.006	0.128	0.976	0.511	0.05*	0.056
WLU per Route	0.024***	0.000	0.952	0.142	0.026	0.191
PAX per Route	0.024***	0.000	0.952	0.142	0.026	0.203
PAX per capita in 100 km	0.041***	0.000	0.707***	0.000	0.267***	0.001

Значимая пространственная автокорреляция была обнаружена для всех рассматриваемых ЧФП индексов. Для индексов ATM/PAX/WLU на взлетно-посадочную полосу пространственная автокорреляция имеет положительное значение, следовательно, аэропорты с высокими и низкими значениями данного индикатора образуют пространственные кластеры. Такой же вывод можно сделать и для ЧФП индексов, построенные на основе количества направлений, обслуживаемых аэропортом. Также соответствует ожиданиям выявленная пространственная автокорреляция для количества пассажиров на душу населения, проживающего в зоне обслуживания аэропорта.

Отметим, что пространственная автокорреляция между значениями ЧФП индексов позволяет идентифицировать наличие агрегированного пространственного эффекта в выборке, но не позволяет сделать вывод о типе пространственной взаимосвязи. Рассмотренные пространственные эффекты имеют различную природу и могут оказывать противоположное влияние. Анализ, основанный на ПСГ модели, позволяет идентифицировать отдельные типы пространственных эффектов и уточнить сделанные выводы.

Для данной выборки были проанализированы модели, основанные на двух различных спецификациях производственной границы:

- Однопродуктовая (PAX) граница (модель Europe1).
- Многопродуктовая (PAX и грузооборот) граница (модель Europe2).

Модель Europe1: однопродуктовый посреднический подход

Спецификация границы для модели Europe1 основана на производственной функции Кобба-Дугласа и имеет вид:

$$\log(PAX) = \beta_0 + \rho_Y W \log(PAX) + \beta_1 \log(Routes) + \beta_2 \log(Population100km) + \beta_3 \log(GDPpc), \quad (14)$$

где

PAX – количество пассажиров, обслуженных аэропортом,

Routes – количество направлений, обслуживаемых аэропортом,

Population100km – численность населения в зоне обслуживания аэропорта,

GDPpc – ВВП на душу населения в регионе.

В рамках исследования было рассмотрено 10 альтернативных спецификаций модели *Eurore1*, представленных на Рис.3.

Для выбора наилучшей спецификации модели был использован классический подход «от простого к сложному». Согласно данному подходу, исследование начиналось с простейшей спецификации модели (МНК), которая усложнялась при обнаружении статистически значимых пространственных эффектов и компонентов неэффективности.

Наличие компонента неэффективности в выборочных данных было подтверждено отрицательной асимметрией остатков OLS модели (значение коэффициента асимметрии -0.659) и статистически значимым значением параметра σ_u классической СГ модели.

Также с помощью индекса Морана I и тестов множителей Лагранжа были обнаружены значимые пространственные эффекты в остатках регрессии. Рассмотренные модели пространственной авторегрессии (SAR) и пространственных ошибок (SEM) также свидетельствуют о наличии эндогенных пространственных эффектов и пространственной неоднородности соответственно.

Вследствие одновременного наличия в данных пространственных эффектов и компонента неэффективности, было рассмотрено несколько спецификаций предложенной ПСГ модели. Выбор спецификации модели основывался на отношении максимального правдоподобия. Таким образом, в качестве наилучшей были выбрана спецификация *SSF(1,0,1,0)*, включающая в себя эндогенные эффекты и пространственную неоднородность; оценки данной модели представлены в Таблица 4.

Таблица 4.

Результаты оценивания параметров Модели *Eurore1*

Модель		Свободный член	$\log(\text{Population100km})$	$\log(\text{Routes})$	$\log(\text{GDPpc})$	σ_v	σ_u	ρ_γ	ρ_v
SSF (1,0,1,0)	Коэф.	12.199	0.068	1.091	-0.182	0.557	1.087	-0.001	0.043
	Станд. откл.	1.390	0.045	0.034	0.125	0.053	0.102	0.001	0.000
	p-значение	$< 10^{-16}$	0.035	$< 10^{-16}$	0.262	$< 10^{-16}$	$< 10^{-16}$	0.016	$< 10^{-16}$
	Log-L								

Рассмотренные спецификации модели с эндогенными пространственными эффектами свидетельствуют о значимости и отрицательной направленности данного типа эффектов ($\rho_\gamma < 0$). Можно заключить, что количество пассажиров, обслуженных соседними аэропортами, оказывает негативное влияние на количество пассажиров анализируемого аэропорта. Данный эффект может объясняться наличием пространственной конкуренции за пассажиров между аэропортами.

Значимая пространственная неоднородность также была обнаружена во всех рассмотренных спецификациях модели. Данный эффект имеет ожидаемую положительную направленность, то есть случайные компоненты модели являются сходными для расположенных рядом аэропортов выборки.

Значимая пространственная взаимосвязь для компонента неэффективности обнаружена не была.

Оценки параметров производственной функции (которые представляют собой значения эластичности по ресурсам для используемой спецификации Кобба-Дугласа) также соответствуют экономической логике. Коэффициент β_1 для количества обслуживаемых направлений равен 1.091 и свидетельствует об эластичности количества обслуженных пассажиров по инфраструктуре аэропорта. Значимое положительное значение эластичности получено и для численности населения в зоне обслуживания аэропорта. Фактор ВВП на душу населения в регионе оказался незначимым.

Одним из главных преимуществ СГ модели является возможность получения индивидуальных значений эффективности аэропортов. Среднее значение оценок эффективности аэропортов выборки составило 0.479 при медиане 0.502. Важным пунктом данного исследования является сравнение значений эффективности, полученных с помощью СГ и ПСГ моделей. Значения эффективности, полученные с помощью ПСГ модели, оказались ниже для относительно изолированных аэропортов (в Греции и Италии) и выше – для аэропортов Франции и Великобритании. Полученные оценки эффективности аэропортов приведены в приложении к диссертации.

Модель Europe2: многопродуктовый посреднический подход

Модель Europe2 также основана на посредническом подходе к деятельности аэропортов и включает одновременное рассмотрение двух компонентов результата – PAX и грузооборот. Спецификация границы модели Europe2 имеет вид:

$$\begin{aligned} -\log(PAX) = & \beta_0 + \rho_\gamma W \log(PAX) + \beta_1 \log(Cargo/PAX) + \\ & + \beta_2 \log(Routes) + \beta_3 \log(Population100km) + \\ & + \beta_4 \log(GDPpc), \end{aligned} \quad (15)$$

где *Cargo* представляет грузооборот аэропорта, а остальные переменные совпадают с определенными в модели Europe1.

Отметим, что составной случайный компонент модели имеет вид суммы: $\varepsilon = v + u$, и модель имеет вид ориентированной на издержки. Глава 2 работы содержит подробное описание многопродуктовой спецификации модели.

В оцененных спецификациях модели Europe2 коэффициент при грузообороте ($\log(Cargo/PAX)$) оказался статистически незначимым. Таким образом, фактор грузооборота аэропорта не позволяет улучшить итоговую модель и может быть исключен из нее. При исключении грузооборота модель

Europe2 сокращается до модели Europe1, и все выводы, сделанные относительно модели Europe1, остаются справедливыми.

Эмпирический анализ аэропортов Испании

Выборка аэропортов Испании содержит информацию о трафике, инфраструктуре и финансовых результатах работы 38 аэропортов в 2009-2010 г.г. Аэропортовая отрасль Испании в сильной степени монополизирована – все аэропорты управляются государственной компанией AENA, представляющей Министерство транспорта. Финансовая информация доступна для всех 38 аэропортов и дополнена данными Eurostat и Open Flights об инфраструктуре и обслуженном трафике.

Значимая положительная автокорреляция обнаружена для большинства рассмотренных ЧФП индексов, что свидетельствует о пространственной кластеризации аэропортов по значениям ЧФП. Данное заключение соответствует предварительным ожиданиям, так как трафик аэропортов Испании во многом связан с туристическими потоками, направленными к морскому побережью.

Используемая спецификация производственной границы в форме Кобба-Дугласа имеет вид (модель Spain):

$$\log(\text{Revenue}) = \beta_0 + \rho_Y W \log(\text{Revenue}) + \beta_1 \log(\text{PAX}) + \beta_2 \log(\text{TerminalCount}) + \beta_3 \log(\text{Population100km}), \quad (16)$$

где *Revenue* отражает совокупный доход аэропорта, *TerminalCount* – количество терминалов аэропорта, а остальные переменные совпадают с определенными в модели Europe1.

Гипотеза о наличии в данных компонента неэффективности, сформулированная на основе существующих исследований, была отвергнута вследствие положительной асимметрии остатков регрессии и незначимо отличающейся от нуля оценки параметра σ_u в СГ модели. Данный результат может быть объяснен особенностью оценивания эффективности в СГ модели: эффективность определяется как расстояние до производственной границы, определяемой на основе всех наблюдений выборки. Если все объекты в выборке имеют близкий уровень неэффективности, то СГ модель будет свидетельствовать об ее полном отсутствии. Учитывая, что все аэропорты Испании управляются одной компанией и используют сходные принципы организации деятельности, невозможность обнаружения неэффективности с помощью СГ модели является вполне обоснованной.

Таким образом, дальнейший анализ был ориентирован на использовании моделей пространственной регрессии с симметричным случайным компонентом – SAR и SEM. Оценивание обеих спецификаций модели позволяет сделать вывод о значимых пространственных эффектах обоих типов – пространственной взаимосвязи и неоднородности. Пространственная неоднородность является более вероятной для монополизированной аэропортовой отрасли Испании, и описывающая ее

SEM модель демонстрирует лучшие статистические свойства. Таким образом, в качестве лучшей спецификации модели была выбрана SEM. Результаты оценивания SEM модели приведены в Таблица 5.

Таблица 5.

Результаты оценивания параметров Модели SEM Spain

Модель		Свободный член	$\log(PAX)$	$\log(TerminalCount)$	$\log(Population100km)$	ρ_v
SEM	Коэф.	-3.465	0.863	0.452	0.054	-0.174
	Станд. откл.	0.483	0.024	0.188	0.022	0.072
	p-значение	$< 10^{-16}$	$< 10^{-16}$	0.016	0.014	0.016
	Log-L					-9.755

Все включенные в модель факторы имеют значимую положительную эластичность, что подтверждает предположение о важности выбранных инфраструктурных и внешних ресурсов аэропорта. Коэффициент ρ_v имеет статистически значимое положительное значение и свидетельствует о существенной пространственной неоднородности.

Эмпирический анализ аэропортов Великобритании

Выборка аэропортов Великобритании содержит информацию о трафике, инфраструктуре и финансовых результатах работы 48 аэропортов в 2011-2013 г.г. Большая часть аэропортов выборки расположена на северо-западе страны в регионе с большой численностью населения и высоким уровнем деловой активности.

Главной особенностью данной выборки (с учетом цели данного исследования) является географическая изолированность аэропортов (Британские острова), которая позволяет рассматривать их как независимые от аэропортов за рамками выборки. Также конкурентная среда в аэропортовой отрасли Великобритании, на создание которой были направлены ряд антимонополистических государственных программ, является более естественной для задачи оценивания эффективности.

Хотя для некоторых ЧФП индексов аэропортов была обнаружена пространственная автокорреляция, в целом был сделан вывод о слабых пространственных эффектах в выборке. Единственным ЧФП индексом, для которого стабильно присутствует значимая пространственная автокорреляция, является отношение WLU к количеству обслуживаемых направлений, отражающее эффективность использования инфраструктуры аэропортов.

Спецификация производственной границы имеет вид (модель UK):

$$\log(PAX) = \beta_0 + \rho_v W \log(PAX) + \beta_1 \log(Routes) + \beta_2 \log(Population100km) + \beta_3 Island \quad (17)$$

Гипотеза о наличии неэффективности в данных была подтверждена значимыми оценками параметра σ_u в СГ и ПСГ моделях.

Выводы о значимости пространственных эффектов в модели являются менее определенными. Единственными эффектами, обнаруженными в остатках регрессионной модели, является эндогенные эффекты. Модель пространственной взаимосвязи SAR подтверждает значимость данных эффектов. В то же время модель пространственных ошибок SEM свидетельствует против присутствия пространственной неоднородности. Отметим, что классические модели пространственной регрессии (SAR и SEM) ориентированы на обнаружение только одного типа пространственных эффектов и не позволяют идентифицировать более сложные структуры пространственных взаимосвязей.

Предложенная ПСГ модель позволяет оценить влияние каждого из пространственных эффектов отдельно. В качестве наилучшей спецификацией ПСГ модели была выбрана SSF(1,0,0,0); оценки данной спецификации приведены в Таблица 6.

Таблица 6.

Результаты оценивания параметров Модели UK SSF(1,0,0,0)

Модель		Свободный член	$\log(\text{Routes})$	$\log(\text{Population}/100\text{km})$	Island	σ_v	σ_u	ρ_γ
SSF(1,0,0,0)	Коэф.	6.933	1.239	0.497	-0.506	0.005	1.020	-0.016
	Станд. откл.	1.318	0.061	0.138	0.256	0.007	0.111	0.004
	p-значение	0.000	$< 10^{-16}$	0.000	0.049	0.450	$< 10^{-16}$	0.000
	Log-L							

Выбор модели SSF(1,0,0,0) свидетельствует о наличии в данных эндогенных пространственных эффектов. Отрицательное значение оценки коэффициента ρ_γ подтверждает гипотезу о пространственной конкуренции между аэропортами Великобритании.

Эмпирический анализ аэропортов Греции

Выборка аэропортов Греции содержит информацию о трафике и инфраструктуре 42 аэропортов в 2007 г. Данные выборки любезно предоставлены доктором Tsekeris, который исследовал эффективность греческих аэропортов на основе АСФ подхода. Вследствие существенного сезонного различия в работы аэропортов Греции, значения показателей были рассмотрены в летний и зимний периоды отдельно. Аэропортовая отрасль Греции также имеет географические особенности, связанные с большим количеством островов и гористой местностью. Все аэропорты Греции, за исключением международного аэропорта Афин, управляются государственными компаниями.

Пассажирский трафик, обслуживаемый аэропортами Греции, имеет большую туристическую составляющую, что приводит к существенным

сезонным отличиям значений ЧФП индексов. На основании проведенных статистических тестов было сделано заключение о статистической незначимости пространственных эффектов между значениями ЧФП индексов аэропортов для обоих сезонов.

Использованная спецификация границы имеет вид (модель Greece):

$$\log(WLU) = \beta_0 + \rho_Y W \log(WLU) + \beta_1 \log(OpeningHours) + \beta_2 \log(RunwayArea) + \beta_3 \log(TerminalArea) + \beta_4 Island + \beta_5 International, \quad (18)$$

где

WLU – совокупный объем обслуженных пассажирских и грузовых перевозок,

OpeningHours – общее время работы аэропорта (в часах),

RunwayArea – общая площадь взлетно-посадочных полос аэропорта,

TerminalArea – общая площадь терминалов аэропорта,

Island – фиктивная переменная для островных аэропортов,

International – фиктивная переменная для международных аэропортов.

Гипотеза о наличии компонента неэффективности в данных подтверждается значимой оценкой коэффициента σ_u (1.003 и 1.876 для летнего и зимнего сезона соответственно), полученной в СГ и ПСГ моделях.

Пространственные эффекты в данной выборке обнаружены не были. Данное заключение подтверждается различными статистическими процедурами: тестами на пространственную автокорреляцию между значениями ЧФП индексов и остатков регрессионной и СГ моделей, а также непосредственным оцениванием отдельных пространственных эффектов с помощью ПСГ модели. При отсутствии пространственных эффектов, наилучшей спецификацией является классическая СГ модель (Таблица 7).

Таблица 7.

Результаты оценивания параметров Модели SF Greece

Модель		Свободный член	$\log(OpeningHours)$	$\log(RunwayArea)$	$\log(TerminalArea)$	<i>Island</i>	<i>International</i>	σ_v	σ_u
<i>Летний сезон</i>									
SF	Козф.	3.085	2.204	-0.558	0.512	-0.777	0.175	0.001	1.003
	Станд. откл.	2.546	0.244	0.263	0.097	0.303	0.256	0.002	0.113
	Р-значение	0.226	$< 10^{-16}$	0.034	0.000	0.010	0.493	0.750	$< 10^{-16}$
	Log-L								-28.456
<i>Зимний сезон</i>									
SF	Козф.	0.083	2.691	-0.455	0.369	-0.441	-0.790	0.001	1.876
	Станд. откл.	4.847	0.141	0.605	0.117	0.060	0.307	0.003	0.212
	Р-значение	0.986	$< 10^{-16}$	0.452	0.002	0.000	0.010	0.752	$< 10^{-16}$
	Log-L								-52.882

Оцененные значения эластичности ресурсов, включенных модель, соответствуют ожиданиям. Время работы аэропортов имеет статистически значимое высокое значение эластичности (2.204 и 2.691 для летнего и зимнего сезонов соответственно). Площадь терминалов аэропорта также является значимым фактором для обоих сезонов. Площадь взлетно-посадочных полос является значимым фактором в летний сезон и незначимым в зимний, что соответствует сезонному характеру загруженности аэропортов Греции. Расположение аэропорта на острове имеет значимый отрицательный эффект для обслуженного им трафика. Международный статус аэропорта также имеет отрицательное влияние, но исключительно в зимний период. Данный факт также может быть объяснен сезонной спецификой трафика, но требует дополнительного исследования.

Оценки значений эффективности работы аэропортов существенно отличаются для зимнего и летнего сезонов (среднее значение эффективности составляет 0.588 для летнего сезона и 0.335 для зимнего). Данное различие является ожидаемым, так как инфраструктурные ресурсы (площадь взлетно-посадочных полос и терминалов) являются постоянными, в то время как результаты работы аэропортов имеют большую сезонную составляющую.

Основные выводы главы

Глава посвящена статистическому анализу пространственных эффектов и эффективности в 4 выборках аэропортов Европы. В исследовании были использованы коммерческий и посреднический подходы к работе аэропортов и рассмотрены различные спецификации используемых ресурсов и результатов работы.

Анализ пространственных эффектов включал в себя статистическое тестирование пространственной автокорреляции между значениями ЧФП индексов и оценивания различных спецификаций ПСГ модели. Параметры моделей оценивались на основе метода, предложенного в главе 3, с использованием разработанного пакета *spfrontier*. Также для всех выборок проводилось оценивание индивидуальных значений эффективности работы аэропортов.

Данные, использованные в исследовании, организованы в 4 выборки: объединенная выборка аэропортов Европы, и отдельные выборки для Испании, Великобритании и Греции. Каждая рассмотренная выборка имеет ряд особенностей, оказывающих влияние на эффективность работы аэропортов и наличие пространственных эффектов.

Общие заключения по рассмотренным выборкам имеют вид:

- **Аэропорты Европы:** значимая компонента неэффективности работы аэропортов, наличие эндогенных пространственных эффектов и пространственной неоднородности.
- **Аэропорты Испании:** значимая пространственная неоднородность и отсутствие других пространственных эффектов и компоненты

неэффективности (объясняемое ограничениями граничного подхода к оцениванию).

- **Аэропорты Великобритании:** значимые эндогенные пространственные эффекты (пространственная конкуренция) и наличие компоненты неэффективности.
- **Аэропорты Греции:** наличие компоненты неэффективности в данных и отсутствие пространственных эффектов всех рассмотренных типов.

Использование ПСГ модели для выборок с различными экономическими условиями и пространственными структурами позволило проверить предложенный подход и подтвердить важность включения пространственных эффектов в СГА. Для обеспечения воспроизводимости данного исследования все данные, использованные в главе, и проведенные вычисления включены в состав разработанного автором пакета *spfrontier*, доступного в официальном архиве CRAN.

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данное исследование посвящено усовершенствованию методологии статистического оценивания эффективности при наличии пространственных эффектов. Основу исследования составляет применение разработанной пространственной стохастической граничной модели к анализу аэропортов Европы.
2. В диссертации приведен обзор существующих исследований эффективности аэропортов и были классифицированы подходы к оцениванию данного показателя. Особое внимание уделено исследованиям, связанным с выявлением пространственных эффектов (пространственной неоднородности и пространственной взаимосвязи).
3. В работе представлены принципы стохастического граничного анализа и пространственной эконометрики. Несмотря на то, что важность пространственных эффектов в стохастическом граничном анализе отмечается многими исследователями, количество методологических исследований данной тематики является недостаточным. В большей части исследований пространственные эффекты либо не включены в стохастическую граничную модель, либо учитываются только в явной форме. Также следует отметить отсутствие общей спецификации стохастической граничной модели с пространственными эффектами и, как следствие, отсутствие программного обеспечения для оценивания моделей данного типа.
4. В работе представлено 4 типа пространственных эффектов: эндогенные и экзогенные пространственные эффекты, пространственная неоднородность и пространственно взаимосвязанные значения эффективности. Было приведено обоснование важности каждого из приведенных типов эффектов в различных прикладных областях.

5. Автором предложена пространственная стохастическая граничная модель, включающая в явном виде все 4 типа пространственных эффектов. Спецификация данной модели была представлена в формальном и достаточно общем виде, в котором пространственные эффекты включены в виде пространственной авторегрессии первого порядка. Также был рассмотрен ряд практически значимых частных случаев модели. Спецификация ПСГ модели является важным компонентом научной новизны работы.
6. Отдельное внимание в работе уделено проблеме идентификации (устойчивого различения) параметров ПСГ модели. Сложность идентификации параметров свойственна пространственной эконометрике и СГА, и предложенная ПСГ модель, объединяющая принципы этих разделов эконометрической науки, также подвержена данной проблеме. В работе представлена формальная постановка проблемы идентификации параметров ПСГ модели и приведена иллюстрация данной проблемы для реальных и искусственно сгенерированных данных.
7. Важным практическим результатом исследования являются выведенные формулы статистического метода оценивания параметров ПСГ модели. Автором выведен закон распределения составного случайного члена ПСГ модели, который представляет собой частный случай многомерного замкнутого скошенного нормального закона. На основе выведенного закона распределения была построена функция правдоподобия. Также был предложен метод оценивания индивидуальных значений эффективности в рамках ПСГ модели.
8. Полученный метод оценивания параметров ПСГ модели реализован в виде программного пакета *spfrontier* для среды R. Пакет включает реализацию всех предложенных алгоритмов и принят в официальном публичном архиве CRAN. Данный пакет является важной частью практической ценности исследования.
9. Статистические свойства предложенного метода оценивания и качество разработанного программного обеспечения были протестированы на основе серии статистических экспериментов. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что предложенный метод дает несмещенные и состоятельные оценки параметров и позволяет различить разные типы пространственных эффектов. Также были получены практически полезные выводы о свойствах получаемых оценок параметров ПСГ модели для выборок разного объема. Кроме того, было проведено сравнение оценок, получаемых пакетом *spfrontier* для частных случаев ПСГ модели, с существующим программным обеспечением.
10. Проведен статистический анализ аэропортов Европы. Анализ включает статистическое тестирование пространственной автокорреляции между значениями ЧФП индексов аэропортов и

применение ряда спецификаций ПСГ модели. Анализируемый набор данных включает объединенную выборку аэропортов Европы (359 аэропортов, 2008-2012 г.г.), а также отдельные выборки аэропортов Испании (38 аэропортов, 2009-2010 г.г.), Великобритании (48 аэропортов, 2011-2012 г.г.) и Греции (42 аэропорта, 2007 г.). Анализ проводился для каждой выборки отдельно, и основные заключения имеют вид:

- *Выборка аэропортов Европы.* Были обнаружены компонента неэффективности, а также пространственная неоднородность и эндогенные пространственные эффекты, которые могут быть объяснены пространственной конкуренцией между аэропортами.
- *Выборка аэропортов Испании.* Аэропортовая отрасль Испании является сильно монополизированной, что не позволило оценить неэффективность их работы. В то же время, была обнаружена значимая пространственная неоднородность, что позволило применить для анализа классические модели пространственной эконометрики.
- *Выборка аэропортов Великобритании.* На основе ПСГ модели были обнаружены значимая неэффективность аэропортов и эндогенные пространственные эффекты. Данные результаты подтверждают гипотезу о наличии пространственной конкуренции в аэропортовой отрасли Великобритании.
- *Выборка аэропортов Греции.* Особенности ландшафта в виде большого количества островов и гористой местности привели к отсутствию значимых пространственных взаимосвязей между аэропортами Греции. Проведенный анализ подтвердил гипотезу об отсутствии пространственных эффектов, а также позволил сделать выводы относительно сезонной изменчивости эффективности работы аэропортов Греции.

Подробные результаты эмпирического анализа приведены в главе 4 диссертации. Использование предложенной ПСГ модели для выборок аэропортов с различными экономическими и географическими условиями позволило проверить предложенный подход и подтвердить важность включения пространственных эффектов в СГА.

Направления дальнейших исследований:

1. Усовершенствование предложенной ПСГ модели. Список возможных улучшений включает в себя использование различных функциональных форм для пространственных эффектов, исследование проблемы идентификации параметров модели, анализ влияния различных спецификаций матриц пространственной близости:
 - В рамках данного исследования пространственные эффекты моделировались в форме авторегрессии первого порядка. Другими возможными формами, требующими исследования, являются

пространственное скользящее среднее и авторегрессии более высоких порядков.

- Возможность идентификации (устойчивого различия) пространственных эффектов разного типа является известной проблемой пространственных моделей, поэтому ее исследование для ПСГ модели является важной задачей.
 - Исследование влияния спецификации матриц пространственной близости представляет собой ещё одно важное направление дальнейшего анализа применимости ПСГ моделей.
2. Усовершенствование предложенного метода оценивания ПСГ модели. Предложенный метод оценивания требует решения задачи многомерной оптимизации, которая может быть решена с помощью различных методов. Вывод аналитических форм для градиента и гессиана функции правдоподобия и разработка эффективных алгоритмов их вычисления позволит получать более устойчивые оценки параметров модели. Также возможным улучшением видится использование EM (expectation-maximization) алгоритма оптимизации.
 3. Разработка альтернативных методов оценивания параметров ПСГ модели. Оценивание параметров многомерного замкнутого скошенного нормального закона распределения является популярной в научном статистическом сообществе задачей. Возможные методы ее решения включают обобщенный метод моментов, обобщенный принцип максимальной энтропии и байесовский вывод.
 4. Применение ПСГ модели в различных прикладных областях. Данное исследование посвящено использованию ПСГ модели для анализа аэропортовой отрасли, однако пространственные эффекты свойственны и многим другим системам. В качестве вероятных областей приложения ПСГ модели можно отметить транспортные системы других видов, городское планирование, рынок недвижимости, учреждения образования и др.

14. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. Pavlyuk, D. (2014). Modelling of Spatial Effects in Transport Efficiency: the 'Spsfrontier' Module of 'R' Software, in Proceedings of the 14th International Conference "RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION" (RelStat'14), Riga, Latvia, pp. 329–334.
2. Pavlyuk, D. (2014). Spatial Aspects of European Airports' Partial Factor Productivity, Transport and Telecommunication, Vol. 15, No 1, pp. 20–26.
3. Pavlyuk, D., Gode, N. (2014). Spatial Aspects of International Migration in European Countries, in "Problems of Economic Policy of the Central and Eastern Europe Countries: Macroeconomic and Regional Aspects, A. Ignasiak-Szulc and W. Kosiedowski, Eds. Torun, Poland: Wydawnictwo Naukowe, pp. 73–92.

4. Pavlyuk, D. (2013). Distinguishing Between Spatial Heterogeneity and Inefficiency: Spatial Stochastic Frontier Analysis of European Airports, Transport and Telecommunication, Vol. 14, No 1, pp.29-38.
5. Pavlyuk, D. (2012). Airport Benchmarking and Spatial Competition: A Critical Review, Transport and Telecommunication, Vol. 13, No 2, pp. 123–137.
6. Pavlyuk, D. (2012). Maximum Likelihood Estimator for Spatial Stochastic Frontier Models, in Proceedings of the 12th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’12), Riga, Latvia, pp. 11–19.
7. Pavlyuk, D. (2011). Application of the Spatial Stochastic Frontier Model for analysis of a regional tourism sector, Transport and Telecommunication, Vol. 12, No 2, pp. 28–38.
8. Pavlyuk, D. (2011). Spatial Analysis of Regional Employment Rates in Latvia, Scientific proceedings of Riga Technical University. Ser. 14. Sustainable spatial development, Vol. 2, pp.56-62.
9. Pavlyuk, D. (2011). Efficiency of Broadband Internet Adoption in European Union Member States, in Proceedings of the 11th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’11), Riga, Latvia, pp. 19–27.
10. Pavlyuk, D. (2010). Multi-tier Spatial Stochastic Frontier Model for Competition and Cooperation of European Airports, Transport and Telecommunication, Vol. 11, No 3, pp. 57–66.
11. Pavlyuk, D. (2010). Spatial Competition and Cooperation Effects on European Airports’ Efficiency, in Proceedings of the 10th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’10), Riga, Latvia, pp. 123–130.
12. Pavlyuk, D. (2010). Regional Tourism Competition in the Baltic States: a Spatial Stochastic Frontier Approach, in Proceedings of the 10th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’10), Riga, Latvia, pp. 183–191.
13. Pavlyuk, D. (2009). Spatial Competition Pressure as a Factor of European Airports’ Efficiency, Transport and Telecommunication, Vol. 10, No 4, pp. 8–17.
14. Pavlyuk, D. (2009). Statistical Analysis of the Relationship between Public Transport Accessibility and Flat Prices in Riga, Transport and Telecommunication, Vol. 10, No 2, pp. 26–32.
15. Pavlyuk, D. (2008). Efficiency Analysis of European Countries Railways, in Proceedings of the 8th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’08), Riga, Latvia, pp. 229–236.