

УДК 332.14

*Регион: экономика и социология, 2013, № 2 (78), с. 3–19*

## **МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОНОМИКИ: ГЕНЕЗИС, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

**В.И. Суслов**

*ИЭОПП СО РАН*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 31 «Роль пространства в модернизации России: природный и социально-экономический потенциал» (проект «Новая парадигма моделирования экономического пространства»)*

### **Аннотация**

Дан краткий обзор известных с начала XIX в. моделей пространственной экономики с особым акцентом на модели А.Г. Гранберга, используемые в ИЭОПП СО РАН более 40 лет. Показаны направления дальнейшего развития этих моделей, движение по которым предполагается осуществить в рамках исследовательского проекта «Новая парадигма моделирования экономического пространства», выполняемого в рамках Программы № 31. Важнейшие из них: проектный подход, системы управления базами данных, геоинформационные системы, агенто-ориентированное моделирование, супервычисления.

**Ключевые слова:** модели, экономическое пространство, региональная экономика, экономическое равновесие, парадигма, агенто-ориентированное моделирование, геоинформационные системы

## Abstract

The paper presents a brief review of spatial economy models known since the beginning of the XX century with special focus on the models offered by Prof. Granberg and further applied by the IEIE SB RAS for more than 40 years. Here we show what is supposed to be modified in these models for the application within this research project, i.e. the project approach, database management, geo-information systems, agent-oriented modeling, and super-calculations.

**Keywords:** models, economic space, regional economy, economic equilibrium, paradigm, agent-oriented modeling, geo-information systems

В 2012 г. начался трехлетний цикл работ по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 31 «Роль пространства в модернизации России: природный и социально-экономический потенциал» (координатор – академик В.М. Котляков). Это продолжение работ по программе Президиума РАН «Фундаментальные проблемы пространственного развития Российской Федерации: междисциплинарный синтез», которой руководил с 2009 г. академик А.Г. Гранберг. В рамках Программы № 31 нами выполняется проект «Новая парадигма\* моделирования экономического пространства».

Название проекта было придумано раньше, чем пришло понимание всей серьезности заявки. Проект следовало бы назвать скромнее. В нем скорее будет сделана попытка интегрировать ростки нового в моделировании пространственной экономики, наметившиеся в последние годы. Основная задача работ прошедшего года по данному проекту – обзор, анализ и обобщение существующих подходов к моделированию экономического пространства. Предполагалось также наметить основные направления работы над «новой парадигмой».

---

\* С конца 60-х годов XX в. термин «парадигма» (от греч. *paradeigma* – пример, образец) стал преимущественно использоваться в философии и социологии науки для обозначения системы идей, взглядов и понятий, исходной концептуальной схемы, модели постановки проблем и их решения, методов исследования, господствующих в течение определенного исторического периода в научном сообществе.

Сначала несколько слов о *дефинициях*. Существуют разные взгляды на соотношение двух направлений исследования: региональной и пространственной экономики. Часто считают, что в рамках первого направления исследуется пространство, обладающее свойством дискретности, а в рамках второго – рассматривается непрерывное пространство. Мы придерживаемся иной точки зрения. Региональная экономика – это точечная экономика, в которой по сравнению с классической (или неоклассической) макроэкономикой более полно учтены внешние связи (потоки продукции, услуг, ресурсов). Пространственная экономика имеет две модификации: с непрерывным и с дискретным представлением пространства. Во втором случае речь идет о многорегиональных системах. Региональная экономика производит «кирпичи» для модельных построений этого направления.

Теперь немного *истории*. Исторически первыми (в начале XIX в.) стали развиваться теоретические концепции для непрерывного пространства (сначала на линии, а потом и на плоскости). Трудями таких ученых, как И. фон Тюнен, В. Лаунхардт (XIX в.), А. Вебер (начало XX в.), В. Кристаллер, А. Лёш, Т. Паландер, Г. Хотеллинг (30–40-е годы XX в.), были заложены основы теории размещения (economics of location). Так, например, в классической модели Тюнена показывалось, как вокруг города, где сосредоточен спрос на сельскохозяйственную продукцию, формируются кольца (кольца Тюнена) – зоны производства сельскохозяйственных продуктов. Чем дальше от города, тем ниже цена земли и меньше возможная рента. Развиваемые концепции фактически преодолевали условия так называемой теоремы пространственной невозможности Старретта, доказанной сравнительно недавно – в 1978 г. В соответствии с ней экономическое пространство имеет смысл моделировать (когда оно существует) при выполнении ряда условий: пространство неоднородно (параметры функций затрат и полезности пространственно дифференцированы), конкуренция несовершенна (отдельные игроки могут влиять на общую ситуацию), отдача на масштаб непостоянна (т.е. увеличив затраты, например, в 2 раза, вы не получите точно двукратного увеличения результата). Пространство возникает, если одно из этих условий соблюдается.

Иначе пространства как такового нет, т.е. оно гомоморфно точке или представляет собой набор точек-автаркий, в каждой из которых производится ровно столько, сколько и потребляется.

Достаточно развитыми и весьма сложными математически являются модели непрерывного пространства Бекмана – Пуу (1981–1985 гг.), Андерсона – Занга (1988 г.), в которых оперируют непрерывными на плоскости (в экономическом пространстве) функциями затрат, объемов производства, наличия факторов, а потоки товаров и факторов представляются векторными полями. В результате теоретического анализа было показано, что и в пространстве (в каждой его точке) цена капитала равна его предельной производительности, зарплата – предельной производительности труда, земельная рента – предельной производительности земли, цена энергии – ее предельной производительности. Товары и энергия транспортируются в направлении самого крутого роста цен. На базе этих моделей был выполнен прикладной анализ структурной стабильности непрерывных двумерных конструкций и показано, что для случая многих регионов устойчивая форма – правильные трех-, четырех- и шестиугольники, но не окружности.

Интересные и достаточно сложные модели разработаны в рамках так называемой новой городской экономики. В этих моделях анализируются внешние и агломерационные эффекты и подчеркивается значение транзакционных издержек. Исследуется ситуация, когда резиденты (фирмы и домохозяйства) конкурируют за место размещения в городе. Некоторые из этих моделей наследуют идеи Тюнена. Только в предопределенном центре не просто происходит торговля, а сосредоточена вся экономическая деятельность, в частности все рабочие места. Основная задача – определить размещение домохозяйств (мест проживания), учитывая доступность работы, доступность услуг и желаемый размер дома. Домохозяйства максимизируют уровень полезности в рамках своих бюджетных ограничений.

Региональная экономика как наука возникла в 50-х годах XX в. на базе работ Я. Тинбергена и У. Айзарда под сильным воздействием кейнсианских макроэконометрических и леонтьевских межотраслевых моделей. На этой базе стали развиваться многорегиональные мо-

дели. Такие модели разрабатываются и используются и сегодня в разных странах. Например, в США наиболее известны три многорегиональные межотраслевые модели: IMPLAN I-O (Input-Output), NIEMO (National Interstate Economic Model), RUBMRIO (Random-Utility-Based Multiregional Input-Output).

Что касается *IMPLAN*, то эта система моделирования изначально разрабатывалась лесной службой Министерства сельского хозяйства США и была рассчитана на применение данных межотраслевых балансов на уровне графства для оценки влияния на экономику различных вариантов использования неприватизированных лесных ресурсов. Но лесная служба исходно сделала IMPLAN такой, чтобы с ее помощью можно было анализировать эффективность работы различных государственных и муниципальных органов. Эта система ориентирована на использование массивов статистических данных, по широте охвата, качеству, масштабу не имеющих аналогов в мире, тем более в СССР и особенно в современной России. Так, интегрированная в систему статистика товарных потоков, обследование которых проводится раз в 5 лет, содержит данные по погрузкам, их стоимости, весу, типу транспортировки, по отгрузкам товара с заводов, оптовых баз, по отдельным розничным сетям. А выборка анализа грузопотоков охватывает сеть протяженностью 245505 миль: 46380 миль хайвэев между штатами, 162000 миль национальной системы хайвэев, 35000 миль прочих национальных автотрасс и 2125 миль городских улиц и сельских дорог. По этой сети отслеживаются грузопотоки между 123 внутренними и восемью зарубежными торговыми зонами по 43 товарным группам и восьми видам транспорта с разделением на экспорт, импорт и внутренние перевозки.

В системе *NIEMO*, созданной первоначально для оценки экономических последствий терактов и техногенных аварий (катастроф), было представлено 114 географических точек, соответствующих регионам, определенным как центроиды по плотности населения. В расширенной модели 1872 центроида. В модифицированную модельную систему под названием «TransNIEMO» была интегрирована национальная дорожная сеть. Стала возможной оценка ущерба от разруше-

ния (в результате теракта или аварии) конкретных мостов, туннелей и прочих транспортных узлов. Наиболее известное приложение модели TransNIEМО – расчет народно-хозяйственного ущерба от разрушения 2 июля 2007 г. моста у г. Миннеаполис. Тогда использовалась модель, включающая 47 отраслей и 52 региона, и оценка ущерба составила 92 млрд долл. США. Оценивались и последствия терактов 11 сентября 2001 г. Был сделан вывод, что на национальном уровне влияние оказалось краткосрочным и умеренным, а на региональном – проявилось через дислокацию фирм.

**Многорегиональные модели** стали разрабатываться и на иных принципах: гравитационные модели (Алонсо, 70-е годы XX в.), переносившие в экономику закон всемирного тяготения классической механики, в которых межрегиональные потоки товаров и т.д. ставились в прямую зависимость от экономических потенциалов регионов-контрагентов и в обратную – от расстояний или затрат на перемещение; энтропийные модели (Вильсон, 70-е годы), спроецированные из термодинамики, в которых максимизация энтропии (ожидаемой информации) приводит к выявлению наиболее вероятного пространственного распределения потоков (товаров и т.д.). Это из числа немногих продуктивных примеров переноса в экономику концептуальных решений из естественно-научных дисциплин. Чаще всего такие попытки неудачны.

Определенным прорывом явились **модели новой экономической географии**, впервые предложенные в одной из работ П. Кругмана в 1991 г. (в 2008 г. он стал лауреатом Премии по экономике памяти А. Нобеля за то, что «встроив отдачу от масштаба в модели общего равновесия, углубил наше представление о детерминантах торговли и размещения экономической деятельности» – так было сказано Нобелевским комитетом), развивающие идеи модели Дикстита – Стиглица (прежде всего о монополистической конкуренции в международной торговле) и затем разрабатывавшиеся М. Фуджитой, Т. Венэблсом и др. Эти модели основываются на теории торговли и несовершенной, в частности моно- и олигополистической, конкуренции. Развитие пространственных систем (центробежные и центростремительные про-

цессы, самоорганизация пространства, выражающаяся в образовании агломераций, кластеров) представляется в них результатом действия разнообразных интересов всех участников рынка. Речь идет именно о развитии пространственных систем, в отличие от классических моделей пространственной экономики Тюнена, Кристаллера и др., в которых пространственные структуры экзогенны и неизменны.

Главное достижение новой экономической географии состоит в том, что она показывает, как размер рынка взаимодействует с масштабом внутренней пространственной экономики фирм, их транспортными расходами. Это позволяет определять размер рынка эндогенными причинами (бельгийский экономист Ж. Фр. Тисс, ведущий ученый Лаборатории теории рынков и пространственной экономики ВШЭ).

Модели новой экономической географии (модель торговли Диксита – Стиглица – Кругмана, модель Кругмана «центр – периферия», модель Кругмана – Венэблса и др.) основаны на посылах, прямо противоположных классическим: наличие экстерналий, положительной отдачи от масштаба, положительных обратных связей. Они сложны математически, в них используются (фактически тестируются в разной форме) плохо формализуемые гипотезы. Пока не известны модели более чем двухрегиональные двухсекторные.

Впрочем, далеко не все исследователи считают новую экономическую географию теоретически значимой, полезной и продуктивной. Так, например, некоторые уважаемые профессора-экономисты считают, что новая экономическая география вызывает «глупое чувство дежавю», что это всего «лишь одна из многих попыток вовлечь в экономическую географию экономистов».

В этом же ряду современных достижений располагается пространственная эконометрика, в которой решаются задачи, аналогичные анализу временных рядов (автокорреляция, гетероскедастичность, коинтеграция, нестационарность). Но если в анализе временных рядов направление связей одно – от прошлого к будущему, то в пространственной эконометрике таких направлений много (например, по сторонам света). И вопрос о том, как совместить эти разные направления в рамках одной модельно-методической схемы, весьма сложен.

Одним из популярных показателей пространственной эконометрии является I-статистика Морана. Она демонстрирует уровень пространственной автокорреляции. Важную роль в ее расчете играет матрица пространственных весов. Это шахматная матрица с перечнем элементов пространственной структуры (списком регионов, административных районов и т.д.) в подлежащем и сказуемом, в клетках которой размещены индикаторы близости соответствующих элементов пространственной структуры (на ее диагонали всегда нули). Часто этот индикатор – ноль, если элементы соответствующей пары не граничат друг с другом, или единица, если они граничат. Такими индикаторами могут быть величины, обратные расстояниям между элементами соответствующей пары.

В анализе временных рядов аналог матрицы пространственных весов можно назвать матрицей временного сопряжения. Ее подлежащее и сказуемое представляют собой ряд натуральных чисел – номеров временных периодов; элементы, расположенные непосредственно под (или над) главной диагональю, равны единице, остальные элементы – нулевые. Так вот, если в формуле статистики Морана такую матрицу использовать вместо матрицы пространственных весов, то эта формула окажется обычным коэффициентом автокорреляции.

Говоря о современных веяниях в моделировании экономического пространства, следует упомянуть модели общего вычислимого равновесия, теории эндогенного роста, сложности, хаоса, сетевой анализ, вычислимые нейросети.

**Модели Гранберга** – это мультирегиональные модели леонтьевского типа, а именно, оптимизационные многорегиональные межотраслевые – ОМММ. За более чем 40-летнюю историю своего существования и использования они существенно изменились как по структуре, так и по способам применения в теоретическом и прикладном анализе. Неизменной осталась их суть: в них региональные межотраслевые модели объединяются с помощью способов межрегиональных связей (типа транспортной задачи) и условий выравнивания региональных уровней потребления населения (скаляризирующих вектор региональных целей) в линейно программные конструкции. Эти конструкции линеаризируют в отдельных своих фрагментах нелинейные



зависимости. Так, в современных модификациях моделей нелинейны зависимости инвестиций последнего года прогнозного периода от суммарных за весь период инвестиций в основной капитал, инвестиций от приростов производственных мощностей, цен мирового рынка от объемов экспорта-импорта (для России, значимой в мировом масштабе страны, это естественно) и некоторые другие. Благодаря этому парето-границы, представляемые такими модифицированными моделями, становятся более реалистичными, отражающими широкие области возможных состояний пространственной экономики, и переход от одного сценария развития к другому осуществляется изменением сравнительно небольшого числа параметров, а не полной перестройкой многих сотен границ на отдельные переменные.

Переменные и ограничения этих моделей линейной оптимизации с учетом так называемых условий дополняющей нежесткости Канторовича образуют систему экономических показателей. Фактически эта система показателей является теоретической концепцией производства, распределения, транспортировки и потребления продукции и услуг в дискретном экономическом пространстве.

По существу, эти модели представляют поле возможностей для экономических игр, а не сами экономические игры. Они, модели, состоят из жестких ограничений «законов сохранения экономической материи»: нельзя в регионе использовать продукции, услуг, ресурсов больше, чем есть, и все, что есть, должно быть как-то использовано (потеря – тоже форма использования). С их помощью находят экстремальные состояния пространственной экономики: оптимальные и равновесные в разных смыслах.

Важное направление использования моделей Гранберга – анализ межрегиональных экономических взаимодействий. Этот анализ основывается на двух разделах математической экономики: на теории экономического равновесия и теории кооперативных игр (которая в данном случае также выступает одним из особых разделов теории экономического равновесия). В первом случае (равновесие Вальраса) идет речь об обычном товарно-денежном рынке и эквивалентном межрегиональном обмене, во втором (равновесие Нэша, ядро системы) – о контрактном рынке и взаимовыгодном обмене.

В концепции рынка по Вальрасу каждый субъект рынка (в данном случае – регион) определяет свой спрос и предложение (вывоз-ввоз, экспорт-импорт продукции), максимизируя свою целевую функцию при бюджетном ограничении в текущих ценах обмена. При этом он не задумывается о партнерах или о каких-то целях общего характера. Далее на всех рынках работает закон спроса и предложения: цена растет, если совокупный спрос (ввоз и импорт) превышает совокупное предложение (вывоз и экспорт), и наоборот. Субъекты рынка пересматривают свои планы – ориентируясь на новые цены. И так далее, пока не будет достигнуто равновесие.

Равновесия с нулевыми бюджетными сальдо – это состояния эквивалентного межрегионального обмена.

В рыночном механизме и равновесии по Нэшу основным элементом выступает договор, контракт, соглашение. Рыночный механизм – это переговорный процесс, в котором субъекты рынка заключают между собой соглашения о взаимодействии, т.е. вступают в коалиции. Субъекты ориентируются на собственные интересы и выходят из старых соглашений-коалиций, если увидят более выгодных партнеров. Равновесие по Нэшу достигается тогда, когда ни один из субъектов и ни одна из коалиций субъектов не имеют возможности улучшить свое положение, изменив состав партнеров.

Один из главных результатов теории кооперативных игр заключается в том, что в равновесии во взаимодействие вступают все субъекты рынка и любая коалиция субъектов, выделившись из полной системы, проиграет. Множество таких равновесных состояний называют ядром системы. Это особое множество – взаимовыгодного межрегионального обмена.

За исследование этих вопросов в теории кооперативных игр в 2012 г. нобелевскими лауреатами по экономике стали Л. Шепли и Э. Рот.

Исследование ядра многорегиональной экономической системы проводится в рамках так называемого коалиционного анализа, когда осуществляются расчеты по всем возможным коалициям регионов. Другое направление коалиционного анализа – расчет эффектов межрегиональных взаимодействий, под которыми понимаются вклады одних регионов в потребление других (в принципе, эффекты можно

рассчитывать на базе любых других макропоказателей). Если в некоторую коалицию регионов добавить новый регион, то потребление регионов исходной коалиции изменится, скорее всего – вырастет. Эти изменения и будут оценками вкладов нового региона в потребление регионов исходной коалиции. Таких оценок много (по числу коалиций регионов без региона-донора). Их среднее и есть эффект межрегиональных взаимодействий (можно еще посчитать дисперсию как характеристику ошибки измерения).

Теория экономического равновесия и кооперативных игр уже не менее 30 лет достаточно успешно используется в прикладном анализе многорегиональных экономических систем с применением ОМММ. Однако только совсем недавно были получены строгие доказательства существования равновесий Вальраса, Нэша (а также Эджворта, нечеткого ядра) для экономических систем, представляемых моделями типа ОМММ. Это было сделано в рамках интеграционного проекта Президиума СО РАН, выполняемого усилиями сотрудников ИЭОПП СО РАН и Института математики СО РАН. Сами доказательства получены В.А. Васильевым.

В качестве примера приведем результаты расчетов для системы союзных республик накануне распада СССР. Такие расчеты делаются и для макрорегионов России, но они пока не очень показательны и выводы из них имеют слишком общий характер, типа: «Сибирь для России играет примерно ту же роль, что и Россия играла для СССР».

Сначала – о результатах коалиционного анализа, т.е. расчетов по всем возможным коалициям 15 бывших союзных республик (на самом деле таких коалиций слишком много, чтобы провести расчеты по всем ним, – 65536; расчеты проводились по выборке, включающей несколько сотен коалиций, построенной с помощью специально разработанного алгоритма). Доля эмерджентного (синергетического) эффекта в общем конечном потреблении союзных республик составляла около 55%. Только Россия в состоянии полной автаркии могла тогда сохранить значение своего целевого показателя на достаточно высоком уровне. И только для России вклад в общесистемное потребление превышал ее потребление, обусловленное внутрисистемными связями: сальдо межреспубликанских взаимодействий было положитель-

ным. Причем для Украины это сальдо было отрицательным в очень большом (до неприличия) размере.

Несколько иную картину давали результаты равновесного анализа (по Вальрасу и Нэшу). Зона ядра сильно вытянута в сторону увеличения доли России в общесистемном непроеизводственном потреблении. Это означает, что непроеизводственное потребление России могло бы быть значительно увеличено за счет других республик, но межреспубликанский обмен оставался бы взаимовыгодным, т.е. коалиции республик без России имели бы меньшее потребление.

При этом фактическая доля непроеизводственного потребления России выше ее доли в состоянии эквивалентного обмена. То есть ее потребление преувеличено по сравнению с тем, которое имело бы место при эквивалентном межреспубликанском обмене. Такая же ситуация, но в гораздо большей степени, была характерна для Казахстана и республик Средней Азии. А вот потребление Украины, республик Закавказья, Прибалтики и особенно Белоруссии занижено по сравнению с равновесным эквивалентным.

Потенциал моделей типа ОМММ близок к исчерпанию. В рамках нашего исследовательского проекта по Программе № 31 предполагается модифицировать их и «погрузить» в более общую модельно-методическую схему, в которой интегрировались бы следующие фундаментальные научные установки и представления.

1. «Рыночные силы» стремятся привести экономическое пространство в состояние равновесия между гипотетическими субъектами-регионами (по мере совершенствования способов моделирования – между реальными субъектами), понимаемого в рамках концепции Вальраса или/и Нэша. Отклонения от равновесия вызываются деятельностью государства, рыночными провалами и инновационным монополизмом.

Одна из задач данного исследовательского проекта – встроить концепции экономического равновесия в «новую парадигму моделирования экономического пространства».

2. Инновационный монополизм приводит к получению временных преференций (прежде всего ценовых) инноватором, который пер-

вым освоил и предложил на рынке новый продукт, технологию. Это основная причина постоянного дискретного дрейфа равновесия в современной экономике.

В рамках уже упоминавшегося интеграционного проекта, выполняемого совместно с ИМ СО РАН, была осуществлена попытка формализовать ситуацию с инновационным монополизмом. Использовалась концепция равновесия Штакельберга, развиваемая в том проекте В.Л. Бересневым. Это концепция равновесия с двумя участниками: лидером и последователем. Фирма-лидер выводит на рынок новый продукт, фирма-последователь пытается занять и расширить свою часть нового рынка. В нашем случае лидер – инновационный монополист, а последователь осуществляет диффузию инновации. Именно его, последователя, деятельность возвращает ситуацию в «обычное» русло более или менее совершенной конкуренции и традиционного равновесия.

3. Экономическое пространство при математическом моделировании представимо двухслойно: первый слой – фоновая экономика в разрезе регионов, второй слой – конкретные крупные субъекты, являющиеся, в частности, реализуемыми инвестиционными проектами.

Другими словами, первый слой – экономика «обычная», «инерционная», «эволюционная», «фоновая». Она характеризуется функциями затрат с быстро падающей эффективностью (на каждую дополнительную единицу результата – ВВП, потребления населения и т.д. – требуется достаточно быстро возрастающее количество затрат: материальных, трудовых, капитальных), что устанавливает жесткие пределы экономическому росту.

Второй слой – экономика «проектная», «прорывная». Она основана на крупных инвестиционных проектах, привносящих в нее новое качество. Практическая реализация этих проектов «сглаживает» функции затрат (не столько вследствие высокой собственной эффективности, сколько благодаря значительным мультипликативным – косвенным и внешним – эффектам, обеспечивающим рост общей экономической эффективности, как, например, для инфраструктурных и научно-технологических проектов). В результате пределы роста становятся менее жесткими, что приводит к уве-

личению темпов экономического развития, доходов и потребления населения и т.д.

4. При моделировании экономического пространства необходимо достичь разумный компромисс между подходом, основанным на представлении динамики сплошных сред (когда однотипно описываются все ячейки – в некоторой регулярной сетке – пространства и связи между ними) и агенто-ориентированным подходом (моделируются реальные субъекты с их интересами: муниципалитеты, города, домашние хозяйства, фирмы, корпорации, отдельные люди).

Агенто-ориентированные модели (АОМ) – специальный класс вычислимых моделей, основанных на имитации индивидуального поведения множества агентов-субъектов и создаваемых на базе компьютерных симуляций. Основная идея данного подхода – построение вычислительного инструмента, представляющего собой множество агентов с набором свойств и правил поведения. Если в микроэкономике оперируют с одним типичным представителем каждого класса реальных субъектов (агентов) рынка – фирмой, корпорацией, домашним хозяйством, банком, государством, то в конструкции АОМ стремятся включить все субъекты с учетом их индивидуальных особенностей. Так, например, существуют модели США, в которых учтены все 300 млн чел. населения, модели Москвы с включением пока нескольких сотен тысяч жителей.

В результате принципиально меняется взаимоотношение между микро- и макроэкономикой. Теперь это не две разные, мало связанные между собой теоретические дисциплины. Закономерности и связи на макроуровне оказываются порожденными процессами, происходящими на микроуровне. Пока еще это не совсем так, но вектор развития теоретических построений имеет такое направление.

Интересен факт: были созданы АОМ, воспроизводящие в вычислительном (симулирующем) эксперименте результаты теоретической конструкции Тюнена. На первом шаге вычислительного процесса вся деятельность сосредоточена в центре круга – в городе, а все земли вокруг него свободны. И где-то к шагу с номером 15000 возникает структура «колец Тюнена».

Вообще говоря, классическая концепция экономического равновесия (Вальраса или Нэша) – тоже агенто-ориентированная, так как речь идет о равновесии как результате действий субъектов рынка, каждый из которых имеет свои цели и обладает возможностями их достижения. Но в ОМММ данные субъекты условны: это регионы в лице «как бы» своих органов власти, стремящихся улучшить благосостояние «своих» граждан, выстраивая планы развития «своей» экономики.

5. Для количественного отражения экономического пространства наряду с традиционными методами статистики, эконометрии, имитационного и нормативного моделирования следует использовать методы *геоинформационных систем* (ГИС), а прикладная реализация модельно-методических схем должна все в большей степени основываться на супервычислительных комплексах.

Географическая информационная система, по существу, представляет собой модель реальной поверхности Земли со всеми важными для приложений особенностями, поддерживает базы данных объектов (т.е. выступает системой управления базами данных), привязанных к местности, и предлагает алгоритмы решения прикладных задач на совокупности этих объектов. Наиболее хорошо они себя зарекомендовали в работе с мелкомасштабными «природными» картами в геологии, сельском хозяйстве, навигации, экологии, градостроительстве и т.д.

Один из лидеров на международном рынке ГИС (около 40% мирового рынка) – компания ESRI (США). В России ESRI-технологии представляют две компании: московская «Дата-плюс» и новосибирская «Дата-Ист» (базируется в Академгородке, входит в ассоциацию «Сибкадемсофт»). ИЭОПП СО РАН начинает сотрудничать с «Дата-Ист» и использовать один из ESRI-продуктов – ArcGIS. Институты СО РАН, находящиеся под эгидой Объединенного ученого совета по наукам о земле, имеют почти 10-летний опыт такого сотрудничества.

Современные ГИС – это не только и даже не столько средства визуализации результатов анализа и моделирования, которые можно получить вне этих систем. Они предоставляют набор инструментов анализа и моделирования, применимых только в рамках картографических форматов. Сейчас активно развиваются и начинают использовать

ся программные продукты, объединяющие возможности АОМ и ГИС. Одним из наиболее продвинутых продуктов подобного рода является AnyLogic, разработанный Санкт-Петербургской IT-компанией с таким же названием.

Обычных вычислительных возможностей, обеспечиваемых, например, настольным ПК или ноутбуком, при работе с большими математическими конструкциями типа АОМ или ГИС становится недостаточно. Впрочем, нам приходилось сталкиваться с явным дефицитом вычислительного ресурса и при работе даже с ОМММ условного малоразмерного (три региона, пять продуктов) примера экономики: для экспериментального «обсчета» теоретической концепции равновесия Эджворта или нечеткого ядра требовались сутки непрерывной работы настольного ПК. Такое же время занимали первые реализации не очень больших прикладных ОМММ 40–45 лет назад на ламповых ЭВМ. Сейчас настольный ПК решает подобную задачу за несколько секунд.

Чтобы оценить прогресс вычислительных возможностей, можно обратиться к следующим фактам.

Первая в мире ЭВМ – ЭНИАК, построенная в США в 1946 г., весила 23 т, ее производительность составляла 300 флопсов, т.е. 300 операций в секунду с числами с плавающей запятой, имеющими мантиссу 128 двоичных разрядов (35–40 десятичных). Обычные, распространенные в настоящее время настольные ПК из числа хороших имеют производительность порядка 10 Гфлопсов (гига –  $10^9$ , миллиард), т.е. они в 3 млн раз производительнее своей «праматери» (при весе с десятков килограмм). У лучших персональных суперкомпьютеров производительность измеряется единицами Тфлопсов (тера –  $10^{12}$ , триллион). Производительность самого мощного, по данным на ноябрь 2012 г., суперкомпьютера «Cray Titan» (США) – 17–27 Пфлопсов (пета –  $10^{16}$ , не имеет названия в русском языке).

Лучший (официально) российский суперкомпьютер – «Ломоносов», созданный в МГУ, занимает в мировом рейтинге 26-е место (22-е по состоянию на июнь 2012 г.), имея производительность 0,9–1,7 Пфлопса. Россия, по данным на ноябрь 2012 г., занимает девятое место по количеству эксплуатируемых компьютерных систем



(восемь суперкомпьютеров в списке Топ-500). Лидируют по этому показателю США – 250 систем. В США установлены пять из 10 самых мощных систем (в Германии – две, в Японии, Китае и Италии – по одной). В первой сотне Топ-500 Россия отмечена всего два раза, а Китай, например, – пять. В Новосибирске самым мощным суперкомпьютером располагает ИВМиМГ СО РАН – 50–60 Тфлопсов. В мировой рейтинг Топ-500 он не попадает.

Считается, что с помощью вычислительных машин с производительностью, измеряемой в Эфлопах (экса –  $10^{18}$ ), будет создаваться виртуальный мир, неотличимый от реального, т.е. модели объектов будут практически гомоморфны реальным объектам. Достигнуто это будет, вероятно, в 30-х годах текущего века. Правда, по-видимому, потребуются качественные скачки в математике, методах вычисления, моделирования, распознавания.

В России самым продвинутым в области АОМ, ГИС и использования супервычислений является коллектив ЦЭМИ РАН, возглавляемый академиком В.Л. Макаровым. ИЭОПП СО РАН налаживает с ним сотрудничество.

В задачи работы над проектом (на 2013 г.) входят: 1) разработка эскиза модельно-программного комплекса в обновленной концепции анализа и прогнозирования развития пространственных систем; 2) освоение программных продуктов, реализующих геоинформационные и агенто-ориентированные подходы к моделированию; 3) конструирование условного примера экономического пространства – декомпозиции разрабатываемого модельно-программного комплекса.

\* \* \*

При написании настоящей статьи автор использовал материалы, подготовленные научными сотрудниками ИЭОПП СО РАН Л.В. Мельниковой, Н.М. Ибрагимовым, Ю.П. Вороновым, за что выражает им свою благодарность.

*Рукопись статьи поступила в редколлегию 07.02.2013 г.*

© Суслов В.И., 2013