

МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗИ СИСТЕМ РАССЕЛЕНИЯ И АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДСКОЙ И ПРИГОРОДНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

Клочков В.В.

*Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»,
Жуковский, Россия*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
vlad_klochkov@mail.ru*

Аннотация. Предлагаются простые математические модели, описывающие влияние скорости и стоимости перевозок на рациональные решения о расселении. Определены пороговые значения параметров технологий городской и пригородной авиационной мобильности, при которых возможен переход к свободному расселению в пределах агломераций с размерами порядка сотен километров.

Ключевые слова: модели взаимосвязи транспорта и расселения, свободное расселение, освоение территории, экономическая скорость передвижения, городская и пригородная авиационная мобильность.

Введение

Развитие транспортных технологий в направлениях повышения скорости перевозок и сокращения их стоимости позволяет, с точки зрения экономической географии, «сжимать» пространство (причем, в позитивном смысле, а не в негативном, под которым понимается обезлюдение территорий, подробнее см., например, [10]), делая всё более отдаленные локации и регионы относительно доступными и близкими, с точки зрения быстроты и доступности перемещения. Основной предмет интереса в данном исследовании – гипотетический переход к воздушному транспорту в местном сообщении, возможно, персональному, наподобие легковых автомобилей, но способному перемещаться в пределах пригородной агломерации с характерными размерами порядка сотен километров в произвольных направлениях, причем, между произвольными точками (от двери до двери). Похожая концепция прорабатывается в ряде стран под названием городской и пригородной авиационной мобильности (ГАМ, UAM – Urban Air Mobility). Прежде всего, в условиях России технологии авиационной мобильности в местном сообщении могли бы способствовать расширению пространства, доступного для активного экономического освоения (в целях расселения, рекреации, размещения производительных сил). Как отмечают специалисты в области экономической географии [1, 2, 3], пока оно в России очень сжато и ограничено несмотря на то, что территория нашей страны является крупнейшей в мире по площади и протяженности. При этом наблюдается высокая даже по мировым меркам концентрация населения в городских агломерациях, особенно в крупнейших, аномально высокая стоимость земли и площади жилья, нежилых помещений, особенно по мере приближения к центрам крупнейших агломераций (и, как следствие – недостаточная обеспеченность населения жилой площадью и т.п. «пространственными» благами, несмотря на крупнейшую в мире территорию). Во многом это – именно плата за отказ от длительного, дорогостоящего (иногда практически невозможного), порой некомфортного и даже небезопасного преодоления расстояний. Т.е. развитие транспорта призвано превратить крупнейшие в мире размеры территории России из экономического обременения, как воспринимают этот фактор некоторые российские и зарубежные исследователи, например, [3, 4], в ключевое преимущество нашей страны, подробнее см. [5, 6].

Как отмечали специалисты в области экономической географии, начиная еще с первых моделей и теорий расселения, его взаимосвязи с транспортом (например, см. [7, 8]), при планировании расселения и размещения экономических объектов имеет место «размен» между транспортными расходами, прямыми и косвенными, и платой за площадь занимаемой земли. Именно поэтому она, собственно, и становится дефицитным ресурсом даже в странах с обширными малонаселенными регионами (притом, потенциально вполне пригодными и даже благоприятными для расселения, рекреации и экономической деятельности по своим природно-климатическим характеристикам), наглядным примером каковых и является Россия. И при недостаточном, для освоения такой территории, развитии транспорта (причем, по объективным технико-экономическим причинам – от сложности создания и поддержания наземной инфраструктуры, опять же, с учетом природно-климатических факторов, до малой плотности населения и потенциальной интенсивности транспортных потоков, которая не обеспечит окупаемости строительства и содержания путевой и дорожной инфраструктуры) именно транспортные факторы заставляют людей и предприятия концентрироваться в относительно ограниченных районах вблизи центров крупнейших городских агломераций и относительно

немногочисленных крупных транспортных магистралей, испытывая дефицит земли и площадей при общей избыточности земли в стране. Поэтому важнейший источник положительного эффекта от кардинального совершенствования транспортных технологий в России – улучшение, оптимизация использования пространства, площадей, земельных участков и др., за счет более свободного расселения и размещения объектов. В масштабах страны в целом развитие транспорта как средства «освоения пространства» и обеспечения его транспортной связанности появляются возможности более полного использования территорий, пригодных и благоприятных для расселения и хозяйственной деятельности, эффективного вовлечения в экономический оборот территориально распределенных ресурсов.

Взаимосвязи транспортных технологий и этих аспектов человеческой деятельности посвящен обширный массив научных публикаций, см., например, [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] – причем, работа [9] представляет собой лишь один из обзоров развития этой области, сокращенно называемой в иностранной литературе LUTI – Land Use and Transportation Interaction models. Как следует из самого названия, сложившаяся в этой области парадигма исследований такова, что системы расселения интегрированы с транспортными системами, и должны моделироваться и оптимизироваться как единое целое – аналогично методологии интегрированных авиационных систем, развиваемой в НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» [14]. В соответствующих работах зарубежных исследователей, как правило, строятся эмпирико-математические, эконометрические модели влияния транспорта на стоимость земли и жилья в городских и пригородных агломерациях. В то же время здесь стоит задача долговременного прогнозирования и стратегического планирования развития транспортных (в т.ч. авиационных) технологий. Параметры стоимости и скорости перемещения еще никогда в истории не принимали такие значения, которые необходимо рассматривать здесь (как гипотетические, для выбора наиболее предпочтительных направлений совершенствования технологий), и потому нет и не может быть эмпирической базы для подобных статистических исследований. А экстраполяция ранее наблюдавшихся изменений параметров транспортных технологий, расселения и пространственного развития экономики может быть в принципе неправомерной, поскольку она не позволяет учесть «переход количества в качество», почти неизбежный при многократном изменении интересующих технологических параметров. Следовательно, единственно возможным методологическим подходом для прогнозирования и планирования качественного улучшения транспортных технологий остается непосредственное, «прямое» экономико-математическое моделирование самих механизмов выбора людьми места жительства и площади приобретаемых земли и жилья, моделирование рационального трудового и рекреационного поведения людей, бизнес-стратегий предприятий, с учетом транспортных расходов – денежных и временных, а также непосредственное моделирование механизмов формирования равновесных цен земли и жилья, равновесных объемов спроса на перевозки и т.п.

1. Простейшие экономико-математические модели взаимосвязи оптимального расселения и транспортных возможностей

Предлагается два вида упрощенных постановок задачи моделирования оптимального расселения с учетом транспортных технологий. Оба варианта подразумевают упрощенное представление географии расселения (радиально-кольцевое размещение населения), но в более общей постановке учитывается расслоение населения по доходам и дифференциация цены единицы площади в зависимости от расположения. Также предложена еще более простая модель, в которой доходы считаются одинаковыми, а «плата» за занимаемую площадь измеряется непосредственно временем в пути и временем на зарабатывание средств на услуги транспорта.

1.1. Общая постановка задачи моделирования расселения с учетом транспортных факторов

Рассмотрим простейшую модель расселения и хозяйственного освоения территории с учетом транспортных возможностей. Пусть население численностью N с заданным распределением по доходам $F(z)$ (где $F(z) \in [0; 1]$ – доля населения, имеющая доход за период, не превышающий z) расселяется вокруг центра некоторой агломерации (концентрическими кругами, безотносительно к направлению), выбирая расстояние от центра r и площадь жилья (используемой индивидом земли, и т.п.) s . Индивид или домашнее хозяйство, с одной стороны, при этом будут нести прямые денежные расходы на транспорт $r \times c_{км}$ и на занимаемую площадь $s \times c_{пл}$. При этом регулярное преодоление расстояния r до центра агломерации (или в ее пределах) и обратно (рассматривается маятниковая миграция, регулярные поездки) потребует времени $2 \frac{r}{v}$, где v – средняя скорость перевозок в транспортной системе. Строго говоря, здесь должна фигурировать не крейсерская скорость

транспортных средств или даже средняя маршрутная скорость их движения (с учетом разгона, торможения, маневров в начале и конце пути – таких как набор высоты, заход на посадку и т.п.), но некая обобщенная скорость, характеризующая общее время поездки «от двери до двери», с учетом

- подвозящего транспорта;
- начально-конечных операций;
- возможного ожидания рейса, от момента принятия решения о поездке до ее начала.

Разумеется, такая скорость будет заведомо ниже всех перечисленных выше показателей скорости, также используемых на транспорте.

При этом зарабатывание средств на поездки и на оплату занимаемой площади потребует от индивида с доходом z времени $2 \frac{r \times c_{км}}{z}$ и $\frac{s \times c_{пл}}{z}$, соответственно. Предположим, что на все описанные блага – занимаемую площадь и перемещения – индивид может тратить не более t_{max} единиц времени за период, общее временное бюджетное ограничение индивида можно записать в следующем виде:

$$t_{\Sigma} = 2 \frac{r}{v} + 2 \frac{r \times c_{км}}{z} + \frac{s \times c_{пл}}{z} \leq t_{max}. \quad (1)$$

Множитель 2 возникает, поскольку учитывается возвратный характер регулярных поездок, маятниковая миграция в пределах агломерации. Здесь фактически считается, что именно время является, в конечном счете, самым ограниченным ресурсом человека (что подчеркивали и классики политической экономии). И именно временем, в конечном счете, люди платят за поездки, занимаемую площадь и прочие блага. В такой постановке собственно «бюджетное» ограничение у всех людей остается примерно одинаковым (у самых бедных и у самых богатых в сутках, как правило, 24 часа), а расслоение по доходам определяет именно разницу в скорости зарабатывания средств. Интересно отметить, что по оценкам зарубежных исследователей [15] общий «бюджет» времени на ежедневные поездки и в самом деле остается стабильным на протяжении нескольких столетий, несмотря на развитие транспортных технологий, рост размеров городских агломераций и т.п. Предполагается, что все затраты (денежные и временные), количества поездок и т.п. величины приведены к одним и тем же периодам времени; также предполагается, что площадь жилья индивида или используемого индивидом земельного участка приведена к площади занимаемой земли – с учетом этажности зданий, санитарных норм их размещения и т.п.

Также для любого расстояния от центра агломерации ограничена общая площадь земли, доступная для проживания, и количество проживающих на данном расстоянии людей, и на расстоянии r от центра агломерации в кольце бесконечно малой ширины dr проживает $dn = \frac{2\pi \times r \times dr}{s(r)}$ жителей, а их общее количество, равное N , определяется интегрированием данного выражения от 0 до максимального радиуса заселенной территории. Для простоты предполагается, что размеры занимаемой индивидом площади в любом случае много меньше, чем расстояние до центра агломерации и даже ширина вышеуказанного «бесконечно тонкого» кольца dr . При этом всё население численностью N должно гарантированно размещаться в пределах радиуса r_{max} , ограниченного сверху скоростью перевозок и лимитом времени на поездки и зарабатывание необходимых на их оплату средств.

Предположим, что задана функция полезности индивида относительно занимаемой площади и времени, которое расходуется на преодоление расстояний и на оплату поездок и занимаемой площади: $U = U(s; t_{\Sigma})$ – в общем случае, возрастающая с ростом занимаемой площади (жилья, земельных участков и т.п.) и убывающая с ростом затрат времени. Индивид стремится максимизировать ее в рамках описанных ограничений.

Зависимость цены земли от расстояния от центра $c_{пл}(r)$ – «свободная» функция в этой модели, которая, в конечном счете, и призвана сбалансировать ограниченное предложение земли и оптимальный спрос индивидов на нее с учетом прямых и косвенных транспортных издержек. В описанной постановке предполагается, что в равновесном состоянии системы расселения и транспорта индивиды будут расселяться на различных расстояниях от центра агломерации и занимать различные площади в соответствии со своими доходами и предпочтениями относительно площади и времени на поездки и зарабатывание необходимых средств. Заметим, что именно на эти аспекты неравенства и расслоения в поселенческом поведении и обеспеченности жилплощадью обращали особое внимание авторы первых экономико-географических моделей взаимосвязи транспорта и расселения, опубликованных в начале XX века, например, модель кольцевого города Берджесса [8].

Так в общем виде может выглядеть модель общего равновесия на рынках земли, труда и транспортных услуг. Причем, даже в представленном выше весьма простом и схематичном виде – с чрезвычайно упрощенным «изотропным» радиально-кольцевым представлением географии

расселения (при очевидной сильной «анизотропии» экономического пространства, которая в упрощенных транспортно-экономических моделях иногда игнорируется, см., например, [16]) – она весьма сложна и не допускает аналитического решения. И все же, такое решение весьма желательно иметь, чтобы хотя бы на качественном уровне оценить полезность для общества возможных улучшений транспортных технологий, и, по возможности, получить хотя бы приблизительные количественные оценки их влияния на доступную площадь расселения (т.е. в масштабах России – на площадь реально освоенного пространства), на объемы спроса на перевозки и, в конечном счете, на благосостояние людей.

Поэтому в рамках такого же упрощенного «изотропного» представления географии расселения – концентрические круги относительно центра агломерации, безотносительно к направлению – можно попытаться построить еще более простую экономико-математическую модель, которая, тем не менее, отражала бы влияние скорости и стоимости перевозок на размеры населенной территории агломерации и доступные для расселения площади, на показатели времени в пути и суммарного времени, затрачиваемого на услуги транспорта, на показатели спроса на перевозки, а также на интегральные показатели удовлетворенности населения.

1.2. Модель оптимального расселения при одинаковых доходах и удовлетворенности индивидов занимаемой площадью и транспортной доступностью

Прежде всего, в такой самой простой модели все индивиды считаются одинаковыми, обладающими равным доходом за период z , т.е. расслоение по доходам не рассматривается. Их функции полезности – как и в общем случае, возрастающие по площади занимаемой земли и убывающие с ростом затрат времени на сами поездки и зарабатывание средств – тоже одинаковы у всех. Как же в такой простейшей модели можно объяснить то, что разные индивиды всё-таки будут, хотя бы и вынужденно, селиться на разном расстоянии от центра агломерации (поскольку все не могут поместиться в центре или вблизи него), занимать разную площадь земли и жилья?

Фактически это условие равенства полезностей при очевидной неодинаковости объемов и качества потребляемых благ означает, что, тем не менее, ни один индивид в обществе не завидует другим. Когда это может быть возможным? Для этого значения функций полезности не должны зависеть от расстояния от центра агломерации. Следовательно, занимаемая площадь должна линейно зависеть от данного расстояния (поскольку здесь для простоты предполагается, что время на его преодоление – как физическое, так и экономическое – зависит от расстояния линейно) с некоторым коэффициентом пропорциональности:

$$s(r) = \sigma \times r. \quad (2)$$

В такой простейшей модели занимаемая площадь вообще не оплачивается непосредственно, деньгами, и определять стоимость земли нет необходимости. Однако она «оплачивается» временем, которое затрачивается на преодоление расстояний, причем, как физическим временем, так и «экономическим», с учетом зарабатывания средств на оплату транспортных услуг.

Возможный вид функции полезности, удовлетворяющий таким требованиям, таков:

$$U = U(s; t_{\Sigma}) = \frac{s}{t_{\Sigma}}. \quad (3)$$

Общее время на физическое преодоление расстояния r и на зарабатывание средств, необходимых для оплаты транспортных услуг, составит

$$t_{\Sigma} = 2 \frac{r}{v} + 2 \frac{r \times c_{KM}}{z}. \quad (4)$$

Для краткости дальнейших выражений целесообразно ввести величину экономической скорости передвижения: $v_{ЭК} = \frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{c_{KM}}{z}}$, так что $t_{\Sigma} = 2 \frac{r}{v_{ЭК}}$.

Таким образом, простейший возможный вид функции полезности, удовлетворяющий вышеуказанным условиям, таков:

$$U = U(s; t_{\Sigma}) = \frac{s}{t_{\Sigma}} = \frac{\sigma \times r}{2 \frac{r}{v_{ЭК}}} = 0,5\sigma \times v_{ЭК}. \quad (5)$$

Осталось определить показатель σ , характеризующий зависимость доступной площади от расстояния до центра агломерации. Он может быть определен из следующих условий.

Во-первых, даже проживающие очень близко к центру индивиды должны быть обеспечены площадью, не меньшей минимально приемлемой: $s \geq s_{min}$, и потому, если принять линейную

зависимость занимаемой индивидом площади от расстояния до центра, тогда придется допустить, что расселение начинается не с самого центра агломерации, а с некоторого минимального радиуса $r_{min} = \frac{s_{min}}{\sigma}$, определяемого этой площадью.

Во-вторых, всё население численностью N должно размещаться в пределах максимально возможного расстояния до центра агломерации, определяемого из условия $r_{max} = 0,5t_{max} \times v_{ЭК}$.

Для удобства введем показатель плотности населения, обратно пропорциональный показателю занимаемой площади и зависящий, как и площадь, от расстояния до центра агломерации:

$$\rho(r) = \frac{1}{s(r)} = \frac{1}{\sigma \times r}. \quad (6)$$

Итак, условие расселения N человек в кольце радиусом от $r_{min} = \frac{s_{min}}{\sigma}$ до $r_{max} = 0,5t_{max} \times v_{ЭК}$ при плотности, меняющейся с ростом расстояния до центра по обратно пропорциональному (гиперболическому) закону $\rho(r) = \frac{1}{\sigma \times r}$, выражается следующим равенством:

$$\begin{aligned} N &= \int_{r_{min}}^{r_{max}} \rho(r) \times 2\pi \times r \times dr = \\ &= \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{2\pi}{\sigma} \times dr = \frac{2\pi}{\sigma} \times \left(0,5 t_{max} \times v_{ЭК} - \frac{s_{min}}{\sigma}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда для искомого показателя σ получаем следующее квадратное уравнение:

$$\sigma^2 \times N - 2\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК} \times \sigma + 2\pi \times s_{min} = 0. \quad (8)$$

При этом его дискриминант должен быть положительным, для чего население не должно превышать следующего порога:

$$N \leq \frac{(\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК})^2}{2\pi \times s_{min}}, \quad (9)$$

чтобы размещаться в пределах максимально приемлемого (по соображениям транспортной доступности) размера заселенной области $r_{max} = 0,5t_{max} \times v_{ЭК}$ с соблюдением ограничений на минимальную занимаемую площадь s_{min} . При выполнении этого условия (как строгого неравенства) квадратное уравнение имеет два положительных корня, из которых, по смыслу модели, интерес представляет наибольший (поскольку обеспечивает, при прочих равных, наибольшую занимаемую площадь и наибольшее значение функции полезности), т.е.

$$\sigma = \frac{\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК} + \sqrt{(\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК})^2 - 2\pi \times s_{min} \times N}}{N}. \quad (10)$$

Соответственно, средняя площадь территории, занимаемая индивидами, изменяется в зависимости от расстояния до центра агломерации по следующему закону:

$$s(r) = \sigma \times r = r \times \frac{\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК} + \sqrt{(\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК})^2 - 2\pi \times s_{min} \times N}}{N}. \quad (11)$$

Объем перевозок, измеряемый в перевезенных пассажирах за период, в рамках такой простейшей модели определяется тривиально. Считается, что каждый индивид совершает за период фиксированное количество местных поездок в пределах агломерации (определяемых его образом жизни – например, поездки на работу и обратно). Обозначив показатель подвижности k , возвратных поездок (туда и обратно) на человека за период, получим и общее количество перевезенных за период пассажиров: $X = 2k \times N$.

Также, интегрируя произведение подвижности, переменной плотности населения и расстояний до центра агломерации в пределах от минимального радиуса $r_{min} = \frac{s_{min}}{\sigma}$ до максимального радиуса заселенной области $r_{max} = 0,5t_{max} \times v_{ЭК}$, можно оценить суммарный пассажирооборот в местном сообщении:

$$W = 2k \times \int_{r_{min}}^{r_{max}} r \times \rho(r) \times 2\pi \times r \times dr = \frac{2\pi k}{\sigma} \times \int_{r_{min}}^{r_{max}} r \times dr =$$

$$= \frac{\pi k}{\sigma} \times \left[(0,5t_{max} \times v_{ЭК})^2 - \left(\frac{s_{min}}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Отношение этих двух показателей транспортной работы в местном сообщении позволяет оценить среднюю дальность поездки:

$$\frac{W}{X} = r_{cp}. \quad (13)$$

Наибольшее достижимое значение функции полезности составит

$$U = 0,5\sigma \times v_{ЭК} = 0,5v_{ЭК} \times \frac{\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК} + \sqrt{(\pi \times 0,5t_{max} \times v_{ЭК})^2 - 2\pi \times s_{min} \times N}}{N}. \quad (14)$$

Заметим, что оно возрастает с ростом экономической скорости перемещения (напомним, равной $v_{ЭК} = \frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{c_{KM}}{z}}$), причем, лишь незначительно медленнее, чем возрастает ее квадрат. Фактически экономическая скорость и является в данной упрощенной модели интегральным показателем совершенства транспортных технологий, объединяющим

- как техническое совершенство транспортной системы, измеряемое средней скоростью перевозки («от двери до двери», с учетом начально-конечных операций, подвозящего транспорта и времени ожидания),
- так и доступность транспортных услуг, измеряемое, фактически, временем на зарабатывание необходимых средств данным индивидом, с учетом его дохода за период.

Итак, повышение экономической скорости (путем повышения физической скорости перевозок, или путем повышения их доступности и сокращения времени, потребного для зарабатывания средств на оплату тарифов) приносит сверхпропорциональный, почти квадратичный прирост благосостояния. Причина в том, что при повышении экономической скорости передвижения линейно возрастает радиус области, доступной для расселения (в рамках временного ограничения на время в пути и время на зарабатывание средств). Но доступные площади (и полезность связанных с ними благ) при этом возрастают по квадратичному закону.

Такая оценка влияния транспортных технологий на удовлетворенность населения от доступного ему для активного освоения пространства справедлива не только для рассматриваемого здесь сегмента местных пассажирских перевозок в агломерациях. Можно считать, что и в дальнем сообщении действуют аналогичные закономерности. Если преодолимые за приемлемое время расстояния благодаря повышению экономической скорости перемещения в пространстве возрастают линейно, то площадь территории, доступной для эффективного освоения, возрастает квадратичным образом. Соответственно, квадратично возрастает и объем связанных с этой территорией доступных благ и ресурсов – начиная от природных ресурсов и заканчивая потенциальными работниками, работодателями и предприятиями-контрагентами. Т.е. похожие закономерности повышения благосостояния при совершенствовании транспортных технологий проявляются не только по отношению к поселенческому и рекреационному поведению населения, но и по отношению к экономической деятельности индивидов и предприятий.

2. Параметрические расчеты для оценки эффективности альтернативных направлений совершенствования транспортных технологий в местном сообщении

Для проведения численных оценочных расчетов можно задаться, например, следующими исходными данными. Предположим, что средняя скорость перевозок в рассматриваемой транспортной системе (физическая) составляет $v = 100$ км/ч, километровый тариф составляет $c_{KM} = 5$ руб/ (пасс. – км), часовой доход индивидов составляет $z = 200$ руб/ч, т.е. экономическая скорость перемещения составляет $v_{ЭК} = \frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{c_{KM}}{z}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{5}{200}} \approx 28,57$ км/ч, максимально допустимое время на поездки и зарабатывание средств на их оплату $t_{max} = 4$ ч/сут, минимально необходимая занимаемая площадь земли в расчете на одного человека равна $s_{min} = 100$ м²/чел, численность населения рассматриваемой агломерации составляет $N = 5$ млн. чел. Проверка условия размещения такого количества жителей в пределах допустимой области показывает, что в ней могло бы разместиться при таких параметрах модели свыше 50 млн. чел., т.е. условие достаточности площади выполняется с многократным запасом (на порядок). Параметр σ принимает значение $\sigma \approx 70 \frac{KM}{KM}$. Т.е. средняя площадь в расчете на одного жителя возрастает линейно от минимальной, составляющей требуемые 100 м²/чел

на минимальном удалении от центра агломерации – около 1,4км, и до более чем 4000м²/чел на максимальном удалении от центра, составляющем около 57 км.

На первый взгляд, принятые в этом примере параметры транспорта для местных перевозок ($v = 100\text{км/ч}$, $c_{\text{км}} = 5\text{руб}/(\text{пасс.} - \text{км})$) достижимы уже при нынешнем уровне развития технологий наземного общественного и индивидуального транспорта. Однако следует учитывать, что похожие показатели скорости движения и стоимости перевозок автомобильный и железнодорожный транспорт обеспечивают, во-первых, для массовых перевозок значительных пассажиропотоков, и во-вторых, только при движении вдоль соответствующих магистралей – весьма редких и дорогостоящих. Во многом это и обуславливает низкую фактическую среднюю скорость передвижения «от двери до двери» в городских и пригородных агломерациях (за исключением точек назначения, расположенных вблизи такого скоростного транспортного каркаса, в пешей доступности). Что касается попытки перемещения далеко в сторону от таких магистралей, фактически, средняя физическая скорость нередко сводится к скорости пешехода. Вопрос об экономической скорости в этом случае становится дискуссионным, но в первом приближении можно считать, что она приблизительно равна физической скорости передвижения – около 5км/ч. Поэтому фактически нынешний городской транспорт все-таки не обеспечивает даже такой, умеренной экономической скорости перемещения и, соответственно, таких, как в вышеприведенном примере, размеров активно освоенных территорий для комфортного расселения.

Если в данном примере принять экономическую скорость передвижения равной 20км/ч, с сохранением прочих данных примера, получится, что максимальный радиус расселения сократится до 40 км, и площадь занимаемой индивидами территории на таком максимальном удалении от центра агломерации составит около 1900м²/чел, а расселение начнется на расстоянии чуть более 2 км от центра. Значение функции полезности, принятой в данной модели, сократится, по сравнению с исходным состоянием, приблизительно вдвое. При этом значение экономической скорости передвижения, равное 20км/ч, является крайне оптимистичной оценкой средней скорости перемещения в городских агломерациях на наземном или, скорее, подземном транспорте, поскольку только дорогостоящий и сложный вынос скоростных магистралей вне уличной сети позволяет реализовать высокие скорости перевозок в различных направлениях – а постоянные затраты на создание и поддержание такой высокоразвитой транспортной инфраструктуры, наподобие системы Московского метрополитена, далеко не полностью финансируются за счет платежей пассажиров по известным, относительно низким тарифам.

Заметим, что в исходном примере с гипотетическим воздушным транспортом в местном сообщении его экономическая скорость лишь незначительно превышала скорость передвижения на современном городском и пригородном общественном транспорте – $v_{\text{эк}} \approx 28,57\text{км/ч}$ против 20км/ч. Причина в том, что в данном примере относительно скоростной (физически) воздушный транспорт является весьма дорогостоящим для населения со средним доходом, принятым в расчетах. Поэтому приоритетное направление совершенствования местного воздушного транспорта в этом случае – повышение экономической доступности, а не средней физической скорости перевозок. И если, например, средняя скорость даже сократится вдвое до $v = 50\text{км/ч}$, но и километровый тариф сократится до $c_{\text{км}} = 2\text{руб}/(\text{пасс.} - \text{км})$, экономическая скорость возрастет до $v_{\text{эк}} \approx 33,33\text{км/ч}$. Тогда максимальный радиус расселения возрастет до 67 км, а доступная площадь в расчете на человека для индивидов, проживающих на таком расстоянии до центра агломерации, составит почти 5500м²/чел, и значение функции полезности увеличится, по сравнению с исходным уровнем, почти в полтора раза.

На рис. 1 изображены графики изменения максимального радиуса зоны комфортного расселения r_{max} и максимально доступной площади в расчете на 1 человека s_{max} (достижимой, разумеется, как раз на максимальном удалении от центра агломерации) по мере возрастания экономической скорости перемещения в реалистичных пределах, полученные в рамках рассмотренных здесь расчетных примеров.

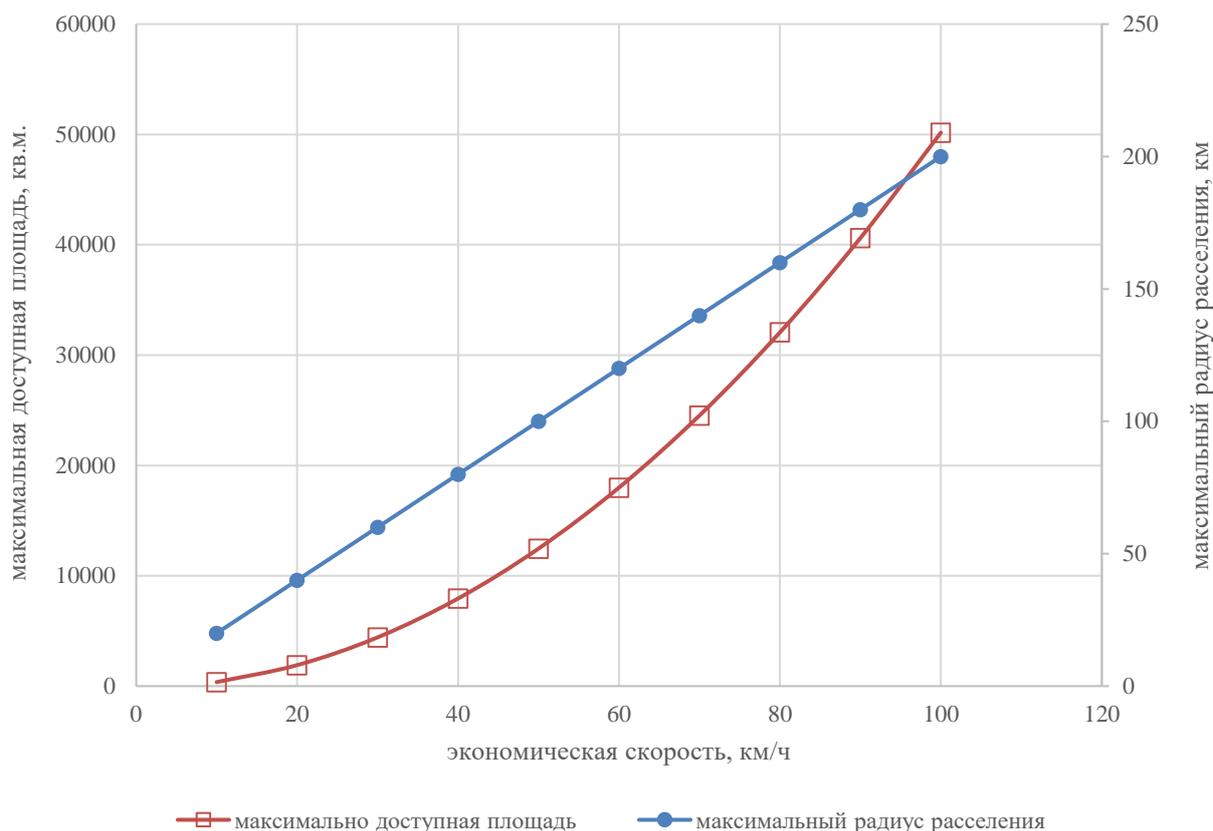


Рис. 1. Влияние экономической скорости перемещения на размеры зоны комфортного расселения и максимально доступную площадь, занимаемую индивидом (пример)

Фактически такие оценки означают, что в большинстве российских регионов с характерной численностью населения порядка нескольких млн человек свободное расселение и свободное регулярное перемещение по всей территории региона реализуется при повышении экономической скорости передвижения до 50-100 км/ч.

3. Требования к авиационным технологиям для реализации концепции свободного расселения в рамках крупных агломераций на основе городской и пригородной авиационной мобильности

В предложенной упрощенной модели все параметры транспортных технологий сведены к единственному интегральному показателю – экономической скорости перемещения. Приоритетные направления развития транспортных технологий в рамках таких упрощенных моделей определяются возможностями повышения экономической скорости перемещения, равной $v_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{c_{\text{км}}}{z}}$. При $v = \frac{z}{c_{\text{км}}}$

физическая скорость перемещения, и стоимость перевозок имеют равную значимость, а экономическая скорость ровно вдвое ниже любой из этих величин. Далее изолированное улучшение какого-либо из параметров – повышение физической скорости, либо экономической доступности перевозок (т.е. даже если они станут бесплатными или мгновенными) – приводит лишь к ограниченному повышению экономической скорости, не более чем вдвое от указанного уровня. На рис. 2 наглядно показано влияние «технических» и «экономических» улучшений на величину экономической скорости перемещения.

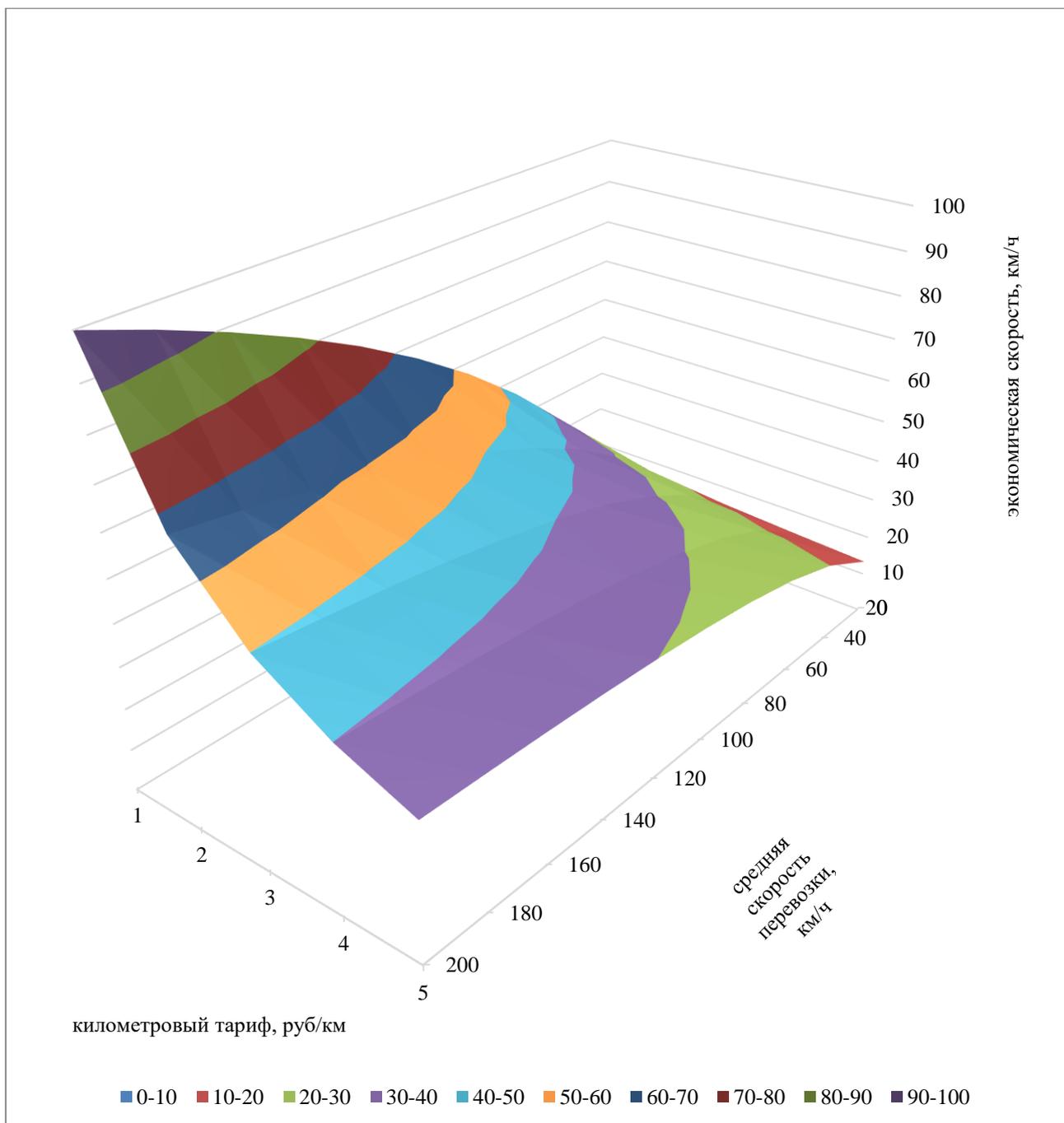


Рис. 2. Влияние средней скорости перевозок и их экономической доступности на экономическую скорость передвижения

То есть развитие транспортных технологий в направлениях повышения физической скорости перемещения и экономической доступности перевозок должно быть, по возможности, сбалансированным. Рассматриваемая здесь концепция свободного расселения в обширных агломерациях на основе городской и пригородной авиационной мобильности требует, как показали проведенные параметрические расчеты, повышения экономической скорости передвижения $v_{эк}$, как минимум, до 50-100 км/ч. И если физическая скорость перемещения на любых современных и перспективных воздушных судах (ВС) с вертикальными взлетом и посадкой, в принципе, уже достаточна, то экономическая доступность авиaperезовок для достижения таких значений экономической скорости должна быть повышена радикально по сравнению с нынешним уровнем.

Разумеется, экономическая скорость зависит от дохода человека за единицу времени, т.е. может сильно различаться для разных доходных групп. В свою очередь, доход в рассмотренной выше наиболее упрощенной модели принят одинаковым для всего населения. На первый взгляд, принятое упрощение слишком сильно, и далее необходимо перейти к более детальным структурным моделям с учетом расслоения населения по доходам. Но принятый здесь упрощенный подход (с одинаковым

доходом всего населения) правомерен, поскольку для перехода к предполагаемой здесь модели расселения гипотетический транспорт в местном сообщении должен быть массовым, доступным, по крайней мере, для значительной части населения. Поэтому, с учетом реально существующего расслоения по доходам, в качестве дохода за период z можно трактовать какой-либо средний, например, медианный доход (что означает, что у половины населения доходы выше этого уровня, а у половины – ниже), либо даже такой его уровень, чтобы у подавляющего большинства населения доход был выше.

Для реализации описанной концепции транспортной системы гипотетические перспективные воздушные суда должны обязательно обладать вертикальными взлетом и посадкой, и в целом расширенными условиями базирования, что в настоящее время реализуется только вертолетами. Но для современных легких вертолетов (пассажировместимостью в пределах 4-5 человек) средние себестоимости перевозок, по объективным технико-экономическим причинам, уже на два-три порядка выше таковых для пригородных поездов или автобусов. Сделать их хотя бы сопоставимыми с показателями легковых автомобилей – масштабный (по требуемым уровням относительного улучшения параметров) и комплексный вызов для авиационной науки и технологий. В целом, как показывают проведенные здесь приближенные оценки, требуется обеспечить, причем, при вертикальных взлете и посадке, круглосуточной и круглогодичной всепогодной эксплуатации,

- среднюю физическую скорость передвижения $v = 100 - 200$ км/ч;
- отношение часового дохода большинства населения к километровому тарифу $\frac{z}{c_{км}}$ – также не менее 100 – 200 км/ч.

Причем, тариф – точнее, его соотношение со средним доходом за период – можно трактовать как средние затраты (приведенные к пассажиро-километру) общественного труда на выполнение единицы транспортной работы, с учетом основных составляющих прямых эксплуатационных расходов, ПЭР, а именно:

- затрат на производство ВС,
- затрат на техническое обслуживание и ремонт, ТОиР,
- затрат на топливо- или энергообеспечение,
- затрат на оплату труда экипажа (но если рассматриваются персональные ВС, то пилот, он же пассажир, уже «оплачивает» каждый километр пути временем, необходимым для его преодоления со средней скоростью v , что уже учтено в другом слагаемом выражения для экономической скорости),
- сборов на инфраструктуру – от посадочных площадок до систем управления воздушным движением, УВД.

Помимо совершенствования воздушных судов в направлении снижения стоимости перевозок, возникают вызовы и для инфраструктуры. Сама система УВД должна допускать безопасное и эффективное использование для взлета и посадки ВС площадок, находящихся в произвольных точках пространства, т.е. «распределенного аэропорта» вместо традиционных «точечных» аэродромов (что является революционным изменением, по сравнению с нынешней системой). Другой масштабный вызов для системы УВД – радикальное повышение количества одновременно находящихся в воздухе ВС, также на два-три порядка по сравнению с современным уровнем, при условии неухудшения показателей безопасности полетов. Кроме того, само управление столь массовыми, возможно, персональными ВС, требует «демократизации» требований к квалификации летного состава, в идеале – их приближение к уровню, характерному для легковых автомобилей, что возможно только при условии комплексной интеллектуальной автоматизации управления движением ВС и воздушным движением, функционированием систем ВС.

4. Заключение

В совокупности создание воздушного транспорта местной авиационной мобильности (городской и пригородной) представляет собой комплексный вызов для авиастроения и воздушного транспорта – в области энергетики, управления, производства и ремонта конструкций, и др. Экономико-математические модели наподобие описанной здесь призваны дать объективные оценки полезности таких изменений и целесообразности необходимых – весьма значительных – затрат, с позиций возможного улучшения землепользования и расселения. Кроме того, они призваны дать хотя бы приблизительные ориентиры целевых уровней параметров транспортных технологий, при которых станут возможными предполагаемые качественные изменения в системе расселения.

Литература

1. *Трейвиш А.И.* Сжатие социального геопространства: между реальностью и утопией // Демоскоп weekly. – 2012. – № 507-508. – С. 1-27.
2. *Гольц Г.А.* Инфраструктура и общество: принципы стратегии опережающего развития России // Экономическая наука современной России. – 2000. – № 2. – С. 5–21.
3. *Орешкин Д.* Пространство и бремя: судьба России глазами географа // Известия, 24 мая 2007 г.
4. *Хилл Ф., Гэдди К.* Сибирское бремя: просчеты советского планирования и будущее России (пер. с англ.) – М.: Научно-образовательный форум по международным отношениям, 2007 – 328 с.
5. *Клочков В.В.* Взаимосвязь стратегий научно-технологического и пространственного развития России // Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник. – Москва, 2019. – вып. 14. ч. 1. – С. 101-107.
6. *Клочков В.В.* Связанность территории и пространственное развитие России: технологии и стратегии / «Регионы России: стратегии и механизмы модернизации, инновационного и технологического развития» (2022): труды 11-й Международной научно-практической конференции. М.: ИНИОН РАН, 2022. – Вып. 17. Ч. 2. – С. 96-100.
7. *Hansen, W. G.* How accessibility shapes land use // Journal of the American Institute of Planners – 1959. – № 25(2) P. 73–76.
8. *Park, Robert E.; Burgess, Ernest W.* The Growth of the City: An Introduction to a Research Project // University of Chicago Press. – 1925. – P. 47–62.
9. *Ransford A. Acheampong & Elisabete A. Silva.* Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // The Journal of Transport and Land Use. – 2015. – Vol. 8, № 3. – P. 11–38.
10. *Rodrigue, J.-P.* The geography of transport systems. – New York: Routledge, 2013.
11. *Van Wee, Bert.* Viewpoint: Toward a New Generation of Land Use Transport Interaction Models // Journal of Transport and Land Use. – 2015. – Vol. 8, № 3. – P. 1-10.
12. *Waddell, P.* Integrated land use and transportation planning and modelling: Addressing challenges in research and practice // Transport Reviews. – 2011. – № 31(2). – P. 209–229.
13. *Wegener, Michael.* Land-Use Transport Interaction Models // In Handbook of Regional Science, edited by Manfred M. Fischer and Peter Nijkamp. – Berlin: Springer Verlag, 2014. – P. 741-758.
14. *Клочков В.В., Топоров Н.Б., Егوشин С.Ф.* Интегрированные авиационные системы // Управление большими системами: сборник трудов. – 2021. – №90. – С. 94-120.
15. *Marchetti, C.* Anthropological Invariants in Travel Behavior // Technical Forecasting and Social Change. – 1994. – Vol. 47, № 1. – P. 75–78.
16. *Горшкова И.В., Клочков В.В.* Упрощенные модели влияния географических и социально-экономических факторов на доступность воздушного транспорта // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: часть VI. Аэромеханика и летательная техника. – М.: МФТИ, 2008. – С. 116–119.