Пространственная **Э**кономика
2009. № 3. С. 20—35

УДК 303.725.34:519.86:332.135

А. С. Величко, Д. В. Давыдов

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО БАЛАНСА

Рассмотрена интервальная модель оценки потенциала торгового взаимодействия регионов, базирующаяся на совмещении межотраслевого балансового подхода, принципа энтропийного равновесия и концепции универсальных решений интервальных оптимизационных задач. Приведены результаты моделирования для экономики Дальнего Востока России.

Межрегиональное взаимодействие, межотраслевой баланс, энтропийный подход, интервальный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Классические подходы к моделированию межрегионального экономического взаимодействия с учетом технологической, транспортной и прочей неоднородности требуют большого объема разнородных статистических данных, которые зачастую отсутствуют в официально публикуемых периодических сборниках. Уже несколько лет не проводятся обследования структуры затрат предприятий, произошел переход в системе классификации от ОКОНХ к ОКВЭД, что затрудняет анализ процессов межрегионального взаимодействия в динамике. Самостоятельный сбор и обработка желаемого статистического материала отдельными исследователями требуют большого

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 26 «Научно-технологический прогноз развития экономики России».

количества временных и финансовых ресурсов, а полученные таким образом данные могут оказаться неполными.

Проблемой современного моделирования региональной экономики является также недостаточное качество статистических данных, необходимых для калибровки параметров теоретических моделей.

В моделях межрегионального взаимодействия применение балансового подхода [5; 12] затруднено отсутствием точных данных по региональным технологическим коэффициентам. Последние обычно подсчитываются только на уровне государства или такого макрорегиона, как Дальний Восток России в целом [3]. Таким образом, не учитывается региональная технологическая дифференциация: известны только приблизительные значения коэффициентов прямых затрат, но не их распределение по регионам.

Стоимость перемещения продуктов между регионами в силу конкуренции различных типов перевозок, коммерческой тайны транспортных компаний, теневого сектора экономики и других причин также в большинстве случаев оценивается приближенно, с использованием экспертных методов. Часто стоимость перемещения полагают пропорциональной среднему расстоянию между регионами, выраженному, например, расстоянием между «столицами» регионов (см., напр., гравитационный подход: [11]).

Проблемы неполноты и неточности статистических данных компенсируются активным развитием методов интервального анализа [4; 10], которые позволяют получать достаточно устойчивые результаты для ограниченных и неполных данных. В частности, региональная технологическая дифференциация с точки зрения данных методов может быть промоделирована интервальными значениями коэффициентов матрицы прямых затрат, равно как и различия в стоимости перемещения товаров могут быть описаны интервальными значениями.

С другой стороны, полноценное моделирование межрегионального взаимодействия предполагает использование данных по объемам перемещения продуктов между регионами. Подобная статистика официально опубликована в агрегированном виде по объемам суммарного ввоза и вывоза некоторых товаров для российских регионов (например, в ежегоднике Росстата «Регионы России»), но отсутствует информация о стоимости межрегиональных потоков между регионами в методологии отраслей межотраслевого баланса. Компенсировать полное отсутствие данных такого рода позволяет энтропийный подход, предложенный к применению для экономических систем в работе [2]. Центральная идея энтропийного подхода заключается в определении и изучении такого состояния экономической системы, которому соответствует экстремальное значение функционала, имеющего смысл меры неопределенности (энтропии). Данное состояние интерпретируется как равновесное, то есть наиболее вероятное, состояние, если предполагать справедливыми условия монополистической пространственной конкуренции на всех межрегиональных рынках.

В данной работе основной упор сделан на поиск адекватных математических методов для решения задач региональной экономики. Предлагается совместное использование интервального и энтропийного подхода для исследования межрегиональных перетоков на основе многорегиональной многоотраслевой модели Леонтьева — Страута [12], энтропийной коммуникационной модели [2] и концепции «универсальных решений» [1] интервальных задач оптимизации.

БАЗОВАЯ ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим модель замкнутой экономики, состоящей из k регионов, в которой имеется n отраслей. Каждая отрасль действует во всех регионах и производит один вид товара, разные отрасли производят разные товары. Пусть x_{ij}^r — количество продукта r-го типа, $r = 1,..., n$, поставляемого из i-го региона в j-й, $i, j = 1,...,k$. Здесь и далее верхние индексы соответствуют типам продукта, нижние — регионам. Пусть также c_{ij}^r — затраты, связанные с поставкой единицы продукта r из региона i в регион j. Тогда суммарные потоки продукта r в j-й регион («полное потребление» продукта r в регионе j) и из j-го региона («полное производство» продукта r в регионе j) соответственно равны

$$X_{*j}^r = \sum_i x_{ij}^r \,,\; X_{i*}^r = \sum_j x_{ij}^r \qquad (1)$$

Определяемое таким образом производство и потребление подчиняется очевидному для замкнутой системы уравнению баланса: $\sum_j X_{*j}^r = \sum_i X_{i*}^r$.

Первая группа ограничений на множество допустимых перетоков представлена балансовыми соотношениями на производство и потребление. Согласно предположениям модели Леонтьева — Страута [12], полное потребление продукта r распадается на внутрипроизводственное потребление z_j^r, имеющее целью производство или восполнение продукта, и конечное потребление y_j^r:

$$X_{*j}^r = z_j^r + y_j^r \qquad (2)$$

При этом внутрипроизводственное потребление моделируется известными [12] балансовыми соотношениями:

$$z_j^r = \sum_p a_j^{rp} X_{j*}^p = \sum_p a_j^{rp} \sum_k x_{jk}^p \ , \ j = 1,...,k, \ r = 1,...,n \ , \tag{3}$$

где a_j^{rp} — технологические коэффициенты, характеризующие затраты продукта r, необходимые для производства единицы продукта p в регионе j.

Подставляя соотношения (1) и (3) в (2), получим окончательное балансовое соотношение, характеризующее межрегиональные потоки продукции и их распределение на конечное и внутрипроизводственное потребление:

$$\sum_i x_{ij}^r = \sum_p a_j^{rp} \sum_k x_{jk}^p + y_j^r \tag{4}$$

для каждого региона $i = 1,...,k$ и продукта $r = 1,...,n$.

Вторая группа ограничений на объемы перетоков связана со стоимостями производства и перемещения продуктов между регионами.

Суммируя затраты $s_{ij}^r = c_{ij}^r x_{ij}^r$, понесенные в связи с производством и поставкой r-го продукта из i-го региона в j-й регион по всем i, находим общую стоимость потребленного в j-м регионе продукта r :

$$S_{*j}^r = \sum_i s_{ij}^r = \sum_i c_{ij}^r x_{ij}^r \tag{5}$$

Слагаемое $s_{jj}^r = c_{jj}^r x_{jj}^r$ в (5) (при $i = j$) отражает стоимость производства продукта r в регионе j, остальные слагаемые (при $i \neq j$) — стоимость производства и перемещения продукта r из региона i в регион j.

Аналогично, суммарные затраты, связанные с производством r-го продукта в i-м регионе и его распределением по всем регионам, равны

$$S_{i*}^r = \sum_j s_{ij}^r = \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r \tag{6}$$

Таким образом, общая стоимость

$$S^r = \sum_i \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r \tag{7}$$

производства и распределения продукта по регионам является одним из условий, ограничивающих множество допустимых распределений потоков продуктов.

Перейдем к описанию целевого функционала. Предположим, что каждый экономический агент формирует потоки производимых и потребляемых им продуктов независимо от других и с равной вероятностью. Вслед за [2] назовем совокупность таких потоков «состоянием» системы. Агрегируем решения отдельных агентов до уровня отраслей и назовем «распределением» в системе трехмерный массив $\{x_{ij}^r\}$ потоков продукта отрасли r из региона i в j, $r = 1,...,n$;

i, j = 1,...,k. Существует много состояний, приводящих к одному и тому же распределению, при этом наиболее вероятное распределение отвечает набору $\{x_{ij}^r\}$, с которым связано наибольшее число состояний. Таким образом, вычисление наиболее вероятного распределения перетоков продукции можно провести, не располагая никакой информацией о поведении отдельных агентов.

Предположение о равновероятности потоков, возникающее из-за отсутствия балансировки модели на фактических потоках, можно ослабить в рамках подхода взвешенной энтропии, когда известно априорное распределение потоков, которое может моделироваться функциональной зависимостью от расстояния между регионами. Балансировка также может быть частично проведена с использованием данных о суммарном вывозе и ввозе продуктов в регионах по официальным данным Росстата (справочник «Регионы России»). Возможно и использование агрегированных оценок потенциала межрегиональных взаимодействий [7].

Обозначим через W количество состояний, соответствующих набору потоков $\{x_{ij}^r\}$. Нетрудно показать, что

$$W\left(\left\{x_{ij}^r\right\}\right) = \frac{N!}{x_{11}^1!(N-x_{11}^1)!}\frac{(N-x_{11}^1)!}{x_{11}^2!(N-x_{11}^1-x_{11}^2)!}\cdots = \frac{N!}{\prod\limits_{i,j,r} x_{ij}^r!}\text{, где } \sum_{i,j,r} x_{ij}^r = N$$

Логарифмируя, находим $\ln W = \ln(N!) - \sum\limits_{i,j,r}\ln(x_{ij}^r!)$. Далее воспользуемся главным членом приближенной формулы Стирлинга для факториала, то есть считаем, что $x! \approx \sqrt{2\pi x}\cdot x^x \cdot e^{-x}$, а значит, $\ln(x!) \approx \ln(\sqrt{2\pi x}) + x\ln x - x$, где e — число Эйлера 2,718..., π — число Архимеда 3,14159... .

В результате преобразований получаем, что

$$H = \ln W \approx -\sum_i\sum_j\sum_r x_{ij}^r \ln x_{ij}^r + c, \tag{8}$$

где c – константа, не зависящая от x_{ij}^r.

Совмещение целевого условия (8) и ограничений (4), (7) приводит к задаче нелинейного программирования

$$\begin{gathered}-\sum_i\sum_j\sum_r x_{ij}^r \ln x_{ij}^r \to \max, \\ \sum_i x_{ij}^r = \sum_p a_j^{rp}\sum_k x_{jk}^p + y_j^r,\ i=1,...,k,\ r=1,...,n, \\ S^r = \sum_i\sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r,\ x_{ij}^r \ge 0, i, j = 1,...,k, r = 1,...,n\end{gathered} \tag{9}$$

относительно переменных x_{ij}^r, $i, j = 1,...,k, r = 1,...,n,$ отражающих межрегиональные перетоки продукции.

Максимизация целевого функционала (8) означает поиск такого набора потоков $\{x_{ij}^r\}$, которому соответствует максимальное количество состояний *W*. Таким образом, в результате решения задачи (9) выявляется наиболее вероятное распределение потоков, удовлетворяющих дополнительным условиям (4), (7).

Заметим, что суммарная стоимость производства и перемещения товаров S^r не может быть задана априорно. Поэтому допустима интерпретация (7) в виде неравенства $S^r \geq \sum_i \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r$, при этом S^r отражает минимально допустимое значение суммарных затрат, при которых допустимое множество в задаче (9) не пусто. Указанные различия в постановке задачи (9) оказываются несущественными при переходе к интервальной модели.

Возможны различные варианты постановок данной задачи, в частности, за счет включения дополнительных ограничений на совокупный выпуск отраслей и конечный спрос на продукты отраслей в регионах. В задаче (9) задан только конечный спрос и предполагается возможность наращивания собственного производства в регионах с использованием абсолютно мобильных и доступных в произвольном объеме факторов производства.

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ

Пусть теперь технологические коэффициенты a_j^{rp} и удельные затраты на поставку продукции c_{ij}^r заданы интервально в силу различных факторов неопределенности и указанных во введении проблем идентификации реальных экономических данных:

$$a_j^{rp} \in [a_{j,0}^{rp} - \Delta a_j^{rp}, a_{j,0}^{rp} + \Delta a_j^{rp}], \; c_{ij}^r \in [c_{ij,0}^r - \Delta c_{ij}^r, c_{ij,0}^r + \Delta c_{ij}^r] \tag{10}$$

с известными значениями центров $a_{j,0}^{rp}, c_{ij,0}^r$ и радиусов $\Delta a_j^{rp}, \Delta c_{ij}^r$ соответствующих интервалов, $i, j = 1,...,k,\ r, p = 1,...,n$.

Ясно, что удовлетворить точно балансовые и стоимостные соотношения (4), (7) при любых a_j^{rp}, c_{ij}^r из (10) в общем случае не представляется возможным. С другой стороны, соотношения (4), (7), (10) можно рассматривать как интервальную систему линейных алгебраических уравнений относительно переменных x_{ij}^r. Среди известных подходов к определению решения интервальных алгебраических систем в рассматриваемой модели наиболее адекватным является применение универсальных решений, подробно рассмотренных в [1].

Введем набор неотрицательных величин $\zeta_j^r \geq 0$ и $\xi^r \geq 0$, $j = 1,...,k$, $r = 1,...,n$ и сформируем вектор ε с компонентами $\zeta_j^r \geq 0$ и $\xi^r \geq 0$ последовательным перечислением координат в фиксированном порядке.

Назовем в соответствии с [1] набор перетоков x_{ij}^r, $i, j = 1,...,k$, $r = 1,...,n$ ε-решением системы ограничений (4), (7), (10), если неравенства

$$-\zeta_j^r \leq \sum_p a_j^{rp} \sum_k x_{jk}^p + y_j^r - \sum_i x_{ij}^r \leq \zeta_j^r,\ j = 1,...,k, r = 1,...,n, \tag{11}$$

$$-\xi^r \leq \sum_i \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r - S^r \leq \xi^r,\ r = 1,...,n$$

справедливы для любых элементов a_j^{rp}, c_{ij}^r, удовлетворяющих (10).

За универсальное решение системы ограничений (4), (7) примем ε-решения с минимальным в некоторой нормировке вектором невязки ε.

Выбирая норму вектора как сумму модулей координат и учитывая неотрицательность переменных x_{ij}^r, следующую из их физического смысла, сформулируем задачу линейного программирования:

$$\begin{gathered}
\|\varepsilon\| = \sum_{j=1}^{k} \sum_{r=1}^{n} \zeta_j^r + \sum_{r=1}^{n} \xi^r \to \min_{x_{ij}^r, \varepsilon_j^r, \xi^r}, \\
-\zeta_j^r \leq \sum_p (a_{j,0}^{rp} - \Delta a_j^{rp}) \sum_k x_{jk}^p + y_j^r - \sum_i x_{ij}^r,\ j = 1,...,k, r = 1,...,n, \\
\sum_p (a_{j,0}^{rp} + \Delta a_j^{rp}) \sum_k x_{jk}^p + y_j^r - \sum_i x_{ij}^r \leq \zeta_j^r,\ j = 1,...,k, r = 1,...,n, \\
-\xi^r \leq \sum_i \sum_j (c_{ij,0}^r - \Delta c_{ij}^r) x_{ij}^r - S^r,\ r = 1,...,n, \\
\sum_i \sum_j (c_{ij,0}^r + \Delta c_{ij}^r) x_{ij}^r - S^r \leq \xi^r,\ r = 1,...,n, \\
x_{ij}^r \geq 0, \zeta_j^r \geq 0, \xi^r \geq 0, i, j = 1,2,...,k, r = 1,...,n.
\end{gathered} \tag{12}$$

Утверждение 1. Неравенства (11) справедливы при любых a_j^{rp}, c_{ij}^r из (10) тогда и только тогда, когда выполняются ограничения задачи (12).

Утверждение 2. Задача (12) разрешима.

Для доказательства достаточно заметить, что множество ограничений задачи (12) не пусто, а целевая функция ограничена снизу нулем.

Пусть теперь решение задачи линейного программирования (12) найдено, и целевая функция имеет оптимальное значение

$$E^* = \|\varepsilon^*\| = \sum_{j=1}^{k}\sum_{r=1}^{n}(\zeta_j^r)^* + \sum_{r=1}^{n}(\xi^r)^* .$$

В результате приходим к детерминированной (неинтервальной) задаче нелинейной оптимизации:

$$\begin{aligned}
&\sum_i\sum_j\sum_r x_{ij}^r \ln x_{ij}^r \to \min,\ \sum_{j=1}^{k}\sum_{r=1}^{n}\zeta_j^r + \sum_{r=1}^{n}\xi^r \le E^*,\\
&-\zeta_j^r \le \sum_p (a_{j,0}^{rp} - \Delta a_j^{rp})\sum_k x_{jk}^p + y_j^r - \sum_i x_{ij}^r,\ j=1,\dots,k,\ r=1,\dots,n,\\
&\sum_p (a_{j,0}^{rp} + \Delta a_j^{rp})\sum_k x_{jk}^p + y_j^r - \sum_i x_{ij}^r \le \zeta_j^r,\ j=1,\dots,k,\ r=1,\dots,n,\\
&-\xi^r \le \sum_i\sum_j (c_{ij,0}^r - \Delta c_{ij}^r)x_{ij}^r - S^r,\ r=1,\dots,n,\\
&\sum_i\sum_j (c_{ij,0}^r + \Delta c_{ij}^r)x_{ij}^r - S^r \le \xi^r,\ r=1,\dots,n,\\
&x_{ij}^r \ge 0,\ \zeta_j^r \ge 0,\ \xi^r \ge 0,\ i,j=1,\dots,k,\ r=1,\dots,n.
\end{aligned} \tag{13}$$

Решение задачи (13) гарантирует нахождение наиболее вероятного распределения товарных перетоков, наилучшим образом удовлетворяющих ограничениям (4), (7) в условиях интервальной неопределенности (10).

Последовательное решение задач (12), (13) позволяет определить наиболее вероятную структуру межрегиональных обменов по каждой из рассматриваемых отраслей с учетом минимально возможных отклонений от имеющихся производственных и транспортных балансов, вызванных неопределенностью параметров (10), что выражено целевой функцией задачи (12).

С другой стороны, суммирование невязок (отклонений) технологических и транспортных ограничений (4), (7) предполагает их однородность, например, за счет выражения в денежном эквиваленте.

Если же технологические балансы представлены в натуральном выражении либо денежный эквивалент определяет высокую несоразмерность соответствующих величин, требуется видоизменить целевую функцию (12) и рассматривать взвешенную сумму элементов невязки, а именно

$$\|\varepsilon\|_{\lambda,\mu} = \lambda\sum_{j=1}^{k}\sum_{r=1}^{n}\zeta_j^r + \mu\sum_{r=1}^{n}\xi^r \to \min_{x_{ij}^r,\varepsilon_j^r,\xi^r}$$

Кроме того, во многих случаях точность выполнения технологических ограничений (12) гораздо более значима, чем точность транспортных ограничений (7). В такой ситуации целесообразно разбить решение задачи (12) на два этапа. На первом этапе строится универсальное решение системы интервальных ограничений (4), (10), а на втором этапе — универсальное решение системы транспортных ограничений (7), (10) с учетом минимальной невязки, полученной на первом этапе.

Отметим дополнительно, что при переходе к численным алгоритмам решения задачи (13) необходимо заменить условия неотрицательности $x_{ij}^r \geq 0$ на более жесткие $x_{ij}^r \geq \delta > 0$ для всех $i, j = 1,...,k$; $r = 1,...,n$, где δ — малый положительный параметр. Последнее связано со структурой целевой функции H.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим применение интервальной модели для экономики Дальнего Востока РФ. Учитывая отраслевую структуру региона, выделим и пронумеруем следующие базовые агрегированные отрасли:

1 — электро- и теплоэнергетика,

2 — топливная промышленность (в т. ч. угольная, нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая, газовая),

3 — горнодобывающая промышленность (черная и цветная металлургия),

4 — лесная промышленность (в т. ч. деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная),

5 — пищевая промышленность (в т. ч. рыбная),

6 — прочие.

Для подготовки данных, необходимых для вычисления агрегированных технологических коэффициентов, была использована симметричная таблица «затраты-выпуск» в ценах покупателей за 2000 г., в млн руб., по Дальнему Востоку России. В данной модели предполагается, что технологии производств в рассматриваемых регионах Дальнего Востока России одинаковы, то есть используются одинаковые коэффициенты прямых затрат для соответствующих отраслей в регионах.

Элементы транспортной матрицы по каждому из продуктов отраслей задавались пропорциональными расстояниям между крупными промышленными центрами анализируемых регионов, причем рассматривались перевозки такими основными видами транспорта, как автомобильный, морской и железнодорожный. Для перечисленных «отраслей» 1–6 была получена матрица технологических коэффициентов (*табл. 1*) и матрица транспортных расстояний (*табл. 2*).

Таблица 1

Матрица коэффициентов Леонтьева для агрегированных отраслей

Отрасль промышленности	1	2	3	4	5	6
1	0,1459	0,0336	0,0335	0,0334	0,0382	0,0461
2	0,4180	0,3658	0,0284	0,0949	0,0103	0,0576
3	0,0129	0,0124	0,3176	0,0135	0,0089	0,1364
4	0,0014	0,0047	0,0017	0,2373	0,0127	0,0156
5	0,0869	0,1126	0,0472	0,0569	0,2015	0,0730
6	0,0262	0,0546	0,0215	0,0628	0,0696	0,2544

Источник: рассчитано по данным работы [3].

Для оценки отраслевой структуры конечного спроса используются различные подходы в зависимости от степени доступности статистических данных (см., напр.: [6; 9]).

Таблица 2

Транспортная матрица регионов Дальнего Востока России, тыс. км

Регион	Приморский край	Хабаровский край	Амурская область	Камчатский край	Магаданская область	Сахалинская область	Республика Саха (Якутия)	Еврейская автономная область	Чукотский автономный округ
Приморский край	0	0,65	1,3	2,4	2,5	0,95	3,0	0,85	4,3
Хабаровский край	0,65	0	0,6	1,9	1,7	0,3	1,8	0,2	3,8
Амурская область	1,3	0,6	0	2,5	2,0	1,2	1,4	0,45	3,7
Камчатский край	2,4	1,9	2,5	0	1,0	1,5	2,0	2,5	2,0
Магаданская область	2,5	1,7	2,	1,0	0	1,0	1,1	2,0	1,8
Сахалинская область	0,95	0,3	1,2	1,5	1,0	0	2,0	0,9	3,4
Республика Саха (Якутия)	3,0	1,8	1,4	2,0	1,1	2,0	0	1,6	2,8
Еврейская автономная область	0,85	0,2	0,45	2,5	2,0	0,9	1,6	0	3,8
Чукотский автономный округ	4,3	3,8	3,7	2,0	1,8	3,4	2,8	3,8	0

Источник: рассчитано авторами по географическим расстояниям между столицами регионов.

При наличии данных только о структуре конечного спроса на продукцию отраслей в некотором базовом межотраслевом балансе по региону, макрорегиону или стране в целом и известном совокупном конечном спросе регионов исследователями иногда делается предположение, что структура конечного спроса на продукты отраслей в разных регионах одинакова. Если совокупный конечный спрос и его структура известны только для макрорегиона или страны в целом, тогда конечный спрос в отдельных регионах может оцениваться пропорционально населению этих регионов. Этот способ оценки является достаточно грубым, поскольку не учитывает влияние структуры совокупного выпуска региона и собственных технологических коэффициентов на отраслевую структуру конечного спроса.

Второй подход заключается в предположении об известной отраслевой структуре совокупного выпуска региона и базовой матрицы коэффициентов прямых затрат для макрорегиона или страны в целом. В этом случае оценка структуры спроса базируется на основном тождестве межотраслевого баланса $y^j = (I - A)x^j$, где x^j — вектор совокупного выпуска отраслей региона j, y^j — вектор конечного спроса на продукты отраслей в регионе j, A — матрица технологических коэффициентов для страны в целом или макрорегиона, I — единичная матрица.

При использовании этого подхода, как правило, возникает несовпадение фактического совокупного конечного спроса региона как суммы оцененных компонент вектора y^j. От этого недостатка избавлен первый подход, но в рамках второго подхода учитывается влияние структуры совокупного выпуска региона на структуру конечного спроса региона.

Общим недостатком указанных методов оценки компонент конечного спроса региона является использование технологических коэффициентов некоторого базового межотраслевого баланса, который является лишь аппроксимацией для истинных коэффициентов прямых затрат данного региона.

Для согласованности данных с матрицей технологических коэффициентов, поскольку таковая специально не прогнозируется для последующих лет, и во избежание дополнительных ошибок измерений в качестве начальной точки для расчетов межрегиональных межотраслевых потоков продуктов в данной работе выбран 2001 г. Для получения данных об отраслевой структуре конечного спроса для дальневосточных регионов (*табл. 3*) в рамках второго подхода использовались данные Росстата по объему и структуре промышленного производства в регионах Дальнего Востока РФ за 2001 г. и данные таблицы 3.

Неточность данных в таблицах 1, 2 согласно интервальной модели определялась как 5%-е двустороннее отклонение от имеющихся данных: $\Delta a_j^{rp} = 0{,}05 a_{j,0}^{rp}$, $\Delta c_{ij}^{r} = 0{,}05 c_{ij,0}^{r}$.

Для нахождения равновесного распределения межрегиональных потоков были поэтапно решены задачи (12), (13) с использованием прикладного пакета оптимизации MINOS-4.0 [8].

Таблица 3

Отраслевая структура конечного спроса, млн руб.

Регион	1	2	3	4	5	6
Приморский край	1859,7	221,7	216,8	558,1	2212,1	1057,4
Хабаровский край	1390,8	749,3	735,4	1079,2	805	2691,2
Амурская область	800,4	73,1	47,3	152,7	143,7	266,6
Камчатский край	923	4,7	1,5	30,3	1570,6	176,3
Магаданская область	397,1	22,7	637,9	6,2	239,3	52,9
Сахалинская область	420,2	1226,1	0	70,5	969,1	67,9
Республика Саха (Якутия)	1351,6	1194,7	8125,7	159,6	249,2	226,0
Еврейская автономная область	75,6	3,3	0	10,1	11,8	114,4
Чукотский автономный округ	216,9	41,7	42,5	0	9,1	0,3

Источник: рассчитано по данным Росстата за 2001 г.

С точки зрения практической реализации предложенной модели можно отметить следующие особенности:

1. Ограничения на неотрицательность $\zeta_j^r \geq 0, j=1,...,k, r=1,...,n$ и $\xi^r \geq 0, r=1,...,n$ следуют из других ограничений в задачах (12) и (13). С другой стороны, если не учитывать их явно, алгоритм симплекс-метода будет увеличивать количество переменных при переходе к канонической задаче и фактически восстановит аналогичные ограничения.

2. Интервальность технологических и стоимостных коэффициентов в простейшем случае можно определить не только заданным уровнем погрешности измерения, например, ± 5% или ± 10%, как это сделано в приведенном выше примере, но и как статистические доверительные интервалы, если статистические наблюдения доступны, но невысокого качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кроме полученной в результате решения задачи (13) матрицы межрегиональных перетоков продукции каждой агрегированной отрасли и всей экономики в целом рассчитывался показатель «связанности» регионов по формуле

$$L_{ij} = \frac{2(x_{ij} + x_{ji})}{E_i + E_j + I_i + I_j},$$

где x_{ij} — поток продукции (одной отрасли или всех отраслей) из региона i в регион j, $E_k = \sum_p x_{kp}$ — суммарный вывоз продукции из региона k во все остальные регионы, $I_k = \sum_p x_{pk}$ — суммарный ввоз продукции в регион k из всех остальных регионов.

Данный показатель «связанности» характеризует отношение суммарной величины перетоков между двумя данными регионами к сумме всех перетоков, в которых участвуют только данные регионы. Наибольшие значения элементов матрицы L соответствуют наиболее тесным экономическим взаимосвязям между регионами.

Методика кластерного анализа позволяет выделить в структуре связей «узловые» и периферийные регионы. Для матрицы связанности регионов размерности n, располагая по убыванию первые n максимальных элементов, можно построить дендрограмму региональной иерархии экономических взаимосвязей регионов по каждому виду продукции. По оси абсцисс откладываются значения первых k максимальных элементов матрицы L, а по оси ординат отмечаются регионы в виде горизонтальных линий. Регионы i и j объединяются в группу или кластер путем проведения вертикальной линии, соответствующей значению L_{ij} на оси абсцисс.

Полученные в результате решения задачи (13) матрицы межрегиональных перетоков продукции каждой агрегированной отрасли и всей экономики в целом были подвергнуты кластерному анализу для выявления степени экономической связанности (взаимозависимости) регионов Дальнего Востока.

На основании проведенных вычислений равновесная структура экономики Дальнего Востока России по совокупности рассмотренных в модели агрегированных отраслей может быть охарактеризована дендрограммой уровня связанности регионов (*рис. 1*).

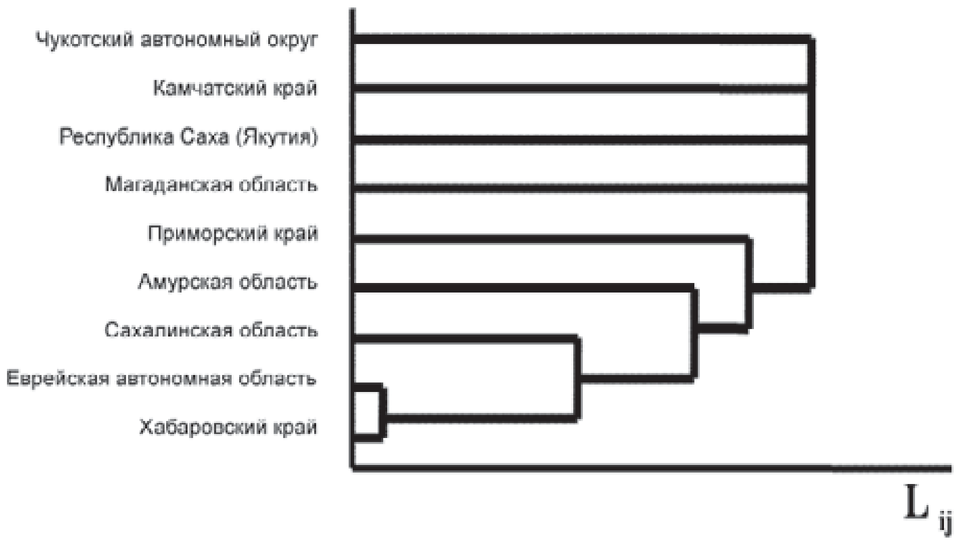

Рис. 1. Кластеризация регионов Дальнего Востока России по уровню экономической связанности

Наиболее активными с точки зрения взаимного обмена продукцией являются регионы юга Дальнего Востока. Наибольшую экономическую взаимозависимость демонстрируют Еврейская автономная область, Хабаровский край и Сахалинская область. К данному «кластеру экономической активности» примыкает Амурская область. Наименьшую связь среди «южных» регионов Дальнего Востока России демонстрирует Приморский край.

Напротив, северные регионы Дальнего Востока оказываются экономически изолированными как по отношению друг к другу, так и по отношению к южным дальневосточным регионам.

Несмотря на высокий уровень агрегации данных, рассмотренная модель позволяет не только говорить о наиболее вероятных потоках, которые могут быть реализованы в будущем. Возможно моделирование влияния на межрегиональные товарные потоки изменений в структуре конечного спроса за счет изменений экспорта и импорта продуктов отдельных отраслей в регионах, технологических коэффициентов и совокупного выпуска в силу реализации крупных инфраструктурных проектов на Дальнем Востоке. Модель позволяет также оценить влияние изменения расстояний при появлении новых транспортных путей и улучшения межрегиональной доступности в случае модернизации транспортной инфраструктуры региона.

В дальнейшем полезно исследовать на чувствительность изменение отдельных технологических коэффициентов (моделирование «технологического прорыва» в отдельном регионе или в целом по отрасли во всех регионах).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматриваются базовая энтропийная модель межрегиональных потоков в рамках межотраслевого подхода и ее обобщение в предположении об интервальности коэффициентов прямых затрат. Под равновесностью получаемого состояния потоков в работе понимается наиболее вероятное в смысле максимизации величины (8) распределение межрегиональных потоков продуктов. Основным недостатком рассматриваемой модели является ее «автаркичность», то есть замкнутость потоков товаров внутри выделенного макрорегиона.

Более реалистичная картина распределения производства, потребления и межрегиональных товарных потоков возникает при введении дополнительных ограничений на ввоз/вывоз товаров из «остального мира» в каждый из регионов. Введение подобных ограничений на практике сталкивается со спецификой таможенного учета и отсутствием измерений объемов ввоза/вывоза между макрорегионами России.

Еще один подход заключается в «подключении» в модель других «регионов», под которыми можно понимать территориально близкие страны или их административные районы (префектуры, провинции и т. п.), что также требует статистических данных о технологических коэффициентах и структуре транспортных затрат, включая затраты на трансграничное премещение товаров.

В результате моделирования получилось, что даже в предположении замкнутости экономики Дальнего Востока структура кластеризации его регионов оказывается в основном схожей с действительностью: наибольшую экономическую связанность демонстрируют южные регионы Дальнего Востока, северные регионы Дальнего Востока оказываются экономически изолированными как по отношению друг к другу, так и по отношению к южным дальневосточным регионам, Республика Саха (Якутия) оказывается слабо связанной как с северными, так и с южными регионами Дальнего Востока. Это позволяет предположить, что при реализации государственных программ, направленных на развитие дальневосточных регионов, наибольший агломерационный эффект могут иметь вложения именно в южные регионы Дальнего Востока России, которые обладают наибольшим потенциалом экономических связей.

Использование интервальных оценок коэффициентов можно рассматривать не только как метод противодействия неполным исходным данным, но и как «запас устойчивости» для решения задачи по отношению к возможным небольшим изменениям внутренней структуры экономики. Последнее означает устойчивость получаемой в работе кластерной структуры регионов.

В целом развитие предложенного подхода к моделированию позволит строить прогнозы развития отдельных макрорегионов России в среднесрочной и долгосрочной перспективе в условиях сложившейся системы статистического учета и с учетом специфической особенности России, вызванной ее географической протяженностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ащепков Л. Т., Давыдов Д. В.* Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления. М.: Наука, 2006.

2. *Вильсон А. Дж.* Энтропийные методы моделирования сложных систем. М.: Наука, 1978.

3. *Власюк Л. И.* Межрегиональные взаимодействия в экономике Дальнего Востока. Дисс. ... канд. экон. наук. Хабаровск, 2005.

4. *Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х.* Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986.

5. *Леонтьев В. В.* Избранные произведения: в 3 т. Т. 1: Общеэкономические проблемы межотраслевого анализа. М.: Экономика, 2006.

6. *Михеева Н. Н.* Макроэкономический анализ на основе региональных счетов. Владивосток: Дальнаука, 1998.

7. *Михеева Н. Н., Ясеновская И. В.* Факторы и условия экономической интеграции на Дальнем Востоке // Вестник ДВО РАН. 2002. № 2.

8. Пакет MINOS для решения оптимизационных задач / Университет Стэнфорда, США. http://www.sbsi-sol-optimize.com/asp/sol_product_minos.htm.

9. *Резерфорд Т., Тарр Д.* Последствия вступления в ВТО для регионов России. 2005. http://go.worldbank.org/NWK0H6OU70.

10. *Шарый С. П.* Интервальные алгебраические задачи и их численное решение. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2000.

11. *Bergstrand J. H.* The Gravity Equation in International Trade: Some Microeconomic Foundations and Empirical Evidence // The Review of Economics and Statistics. 1985. Vol. 67. № 3.

12. *Leontief W., Strout A.* Multi-regional input-output analysis // Structural Inderpendence and Economic Development / Ed. T. Barna. London: Macmillan, 1963.