

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Албегов М. М., Бронштейн А. Я.

(Москва, Ленинград)

В СССР внимание специалистов давно уже привлекает проблема учета агломерационного эффекта в задачах размещения производительных сил и региональной экономики. Здесь достигнуты определенные успехи, однако не удавалось найти общий и эффективный способ ее решения: камнем преткновения являлись нелинейность и комбинаторика (при значительной размерности задачи). В статье показано, как с помощью наиболее эффективного метода — линейного программирования — это решение получается.

ВВЕДЕНИЕ

Агломерационный эффект (АЭ) издавна изучается двумя ветвями региональной экономической науки: урбанистикой и теорией размещения производительных сил. Первая понимает под ним социально-экономические преимущества и недостатки, которые являются результатом функционирования производства, объектов непроемкой сферы и жизнедеятельности населения в городских агломерациях, по сравнению с изолированными населенными пунктами. Вторая — социально-экономические преимущества и недостатки, которые возникают при совместном размещении производственных объектов по сравнению с изолированным их строительством. Представленная работа посвящается анализу агломерационного фактора именно с этих позиций.

В СССР АЭ с той или иной степенью глубины рассматривался в ряде работ послевоенного периода. При этом делался упор на его количественной оценке для некоторых сочетаний фиксированных по мощности производств [1].

С конца 60-х гг. разрабатывается проблема непосредственного включения фактора агломерации в модели внутрирайонного размещения производства. При этом специфика наиболее распространенных из них предопределяла и подходы к формальному описанию АЭ: в моделях непрерывного типа [2] строилась специальная функция АЭ; при вариантных постановках задачи [3] он учитывался при расчете затрат на создание промышленного узла для разных вариантов его развития.

Эти подходы обладали серьезными недостатками, главные из которых: существенная нелинейность функционала, затрудняющая численную реализацию модели (при непрерывной постановке); поиск оптимального решения на сильно суженном поле допустимых планов (при вариантной постановке). Они предопределили необходимость специального анализа проблемы моделирования АЭ и разработки эффективных методов его отображения в более широких моделях размещения производительных сил и региональной экономики.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Хотя, как было сказано, исследования по включению АЭ в модели внутрирайонного размещения производства ведутся в СССР с конца 60-х гг., первая попытка систематизации накопленных методов предпри-

нята лишь в начале 80-х (см. [4]). В упомянутой работе намечены два основных подхода, однако проведенный анализ неполон: не рассматриваются, например, методы построения функций АЭ. Ниже, исходя из намеченного в [4], реализован более детальный анализ имеющихся литературных источников.

Логика первого подхода [3, 5] достаточно проста. Она прямо вытекает из традиционной практики проектных разработок. Суть подхода в том, что задача оптимизации внутрирайонного размещения производства решается в два этапа. На первом для каждого пункта размещения задается несколько вариантов развития, под которыми понимается строительство в этих пунктах различных комбинаций производств (включая пустую и комбинации из одного производства). При формировании вариантов рассчитываются соответствующие затраты с учетом АЭ комбинаций производств. На втором этапе для каждого пункта определяется оптимальная стратегия развития путем перебора сформированных на первом этапе вариантов.

Следовательно, особенность данного подхода состоит в самой постановке задачи: требуется найти не пункты размещения для рассматриваемых производств (как обычно принято в таких задачах), а варианты развития этих пунктов; в качестве исходных выступают затраты не на изолированное размещение производств, а по пункту в целом при том или ином варианте.

Недостаток такой постановки и соответственно подхода к моделированию фактора агломерации заключается в том, что формирование вариантов развития осуществляется экзогенно, обычно вручную, и поэтому удастся рассмотреть весьма ограниченное их количество. В результате оптимальное решение ищется на сильно суженном поле допустимых планов и нет гарантии, что оптимум попал в его пределы. Более того, поле допустимых планов может оказаться пустым, так как варианты развития отдельных пунктов не учитывают задач региона в целом; в частности, на данной итерации может быть невыполнимой производственная нагрузка на регион или невозможным решение ряда социальных задач общерегионального характера, например рациональная занятость населения для трудоизбыточных регионов. В [3] эти недостатки устраняются включением таких моделей в систему с прямыми и обратными связями, в других блоках которой корректируются результаты расчетов по данной модели. Однако вычислительные трудности воспрепятствовали широкому распространению такого подхода.

При втором, альтернативном подходе на каждой итерации известны-ми считаются перечень размещенных в регионе производств, затраты при централизованном размещении каждого и АЭ от их всевозможных комбинаций*. Это позволяет определить затраты при совместном размещении производств.

Следовательно, во втором подходе в отличие от первого размещаются одиночные предприятия, а варианты развития пунктов представляют композицию такого размещения и формируются автоматически в процессе реализации модели на ЭВМ. Благодаря этому появляется возможность охватить все поле допустимых планов и исчезает опасность утраты оптимума.

Необходимо отметить, что далее не будут специально обсуждаться вопросы увязки задачи внутрирайонной оптимизации с задачами смежного и верхнего уровней, поскольку не они являлись целью исследования.

АЭ вводятся в модель с помощью соответствующей функции, методы построения которой весьма разнообразны. Их можно разбить на две группы. В первую объединяются методы, в которых аргументы функции АЭ описывают размещение одиночных объектов; во второй группе

* Естественно, что АЭ зависит не только от комбинации производств, но и от специфики площади, на которой они размещаются. И хотя числовые характеристики такой зависимости пока в литературе не встречались, можно предположить, что со временем они станут доступны.

аргументами функции АЭ являются дополнительные булевы переменные, показывающие размещение комбинаций объектов.

Рассмотрим сначала первую группу. В ней в качестве самой ранней попытки можно выделить подход [2], при котором в явном виде выписываются эффекты от всех возможных сочетаний из двух, трех и т. д. предприятий. Последним, очевидно, будет сочетание из всего возможного количества предприятий в пункте. Поясним это на примере, когда максимальное число объектов равно 4.

Обозначим: x_j^r — булева переменная, равная 1, если предприятие j размещается в пункте r , и 0 — в противном случае, $j=1, \dots, 4$; $\mathcal{E}_i^r(x_1^r, x_2^r, x_3^r, x_4^r)$ — АЭ всех возможных сочетаний из i предприятий, $i=2, 3, 4$. Тогда АЭ в пункте r

$$\mathcal{E}^r(x_1^r, x_2^r, x_3^r, x_4^r) = \mathcal{E}_2^r + \mathcal{E}_3^r + \mathcal{E}_4^r,$$

где

$$\mathcal{E}_2^r = A_{12}^r x_1^r x_2^r + A_{13}^r x_1^r x_3^r + A_{14}^r x_1^r x_4^r + A_{23}^r x_2^r x_3^r + A_{24}^r x_2^r x_4^r + A_{34}^r x_3^r x_4^r,$$

$$\mathcal{E}_3^r = A_{123}^r x_1^r x_2^r x_3^r + A_{124}^r x_1^r x_2^r x_4^r + A_{134}^r x_1^r x_3^r x_4^r + A_{234}^r x_2^r x_3^r x_4^r,$$

$$\mathcal{E}_4^r = A_{1234}^r x_1^r x_2^r x_3^r x_4^r.$$

Здесь $A_{j_k \dots j_l}^r$ — АЭ сочетания $(j_k, \dots, j_l)$ в пункте r , $j_k, j_l = 1, \dots, 4$.

Главный недостаток этого метода очевиден: функция является степенной, что сильно осложняет расчеты. Кроме того, уже при небольшом количестве объектов становится затруднительным вводить функцию $\mathcal{E}^r$ в ЭВМ из-за быстрого роста числа слагаемых.

В [6] размещаемые предприятия объединяются в непересекающиеся группы (т. е. каждое может входить только в одну группу), которые образуются по технологическому принципу. Если обозначить c_j^r — затраты при размещении предприятия j в пункте r ; U_p — множество индексов предприятий, входящих в группу p , то функция АЭ имеет вид

$$\mathcal{E}^r(x_1^r, x_2^r, \dots, x_I^r) = \sum_p k_p^r \sum_{j \in U_p} c_j^r x_j^r,$$

где k_p^r — коэффициент экономии затрат при размещении группы p в пункте r .

Этот метод имеет принципиальный недостаток: АЭ группы p реализуется даже в том случае, когда не все входящие в нее предприятия разместились в r . Действительно, $\sum_{j \in U_p} c_j^r x_j^r \neq 0$, если хотя бы один из

x_j^r ($j \in U_p$) отличен от 0. Непересекаемость выделенных групп, на которой настаивают авторы [6], данного недостатка, очевидно, не устраняет.

В [7—9] функция АЭ строится, исходя из известных эффектов парных взаимодействий (т. е. от комбинаций из двух объектов) и априорно задаваемой весовой функции, характеризующей снижение затрат при размещении в пункте более двух предприятий. В этом случае функция АЭ такова

$$\mathcal{E}^r(x_1^r, x_2^r, \dots, x_I^r) = \frac{1}{2} \lambda(m^r) \sum_{j_1 j_2} \mathcal{E}_{j_1 j_2}^r x_{j_1}^r x_{j_2}^r,$$

где $m^r(X) = \sum_j x_j^r$ — количество предприятий, разместившихся в пункте r ; $\lambda(m^r)$ — сэкономленные затраты при групповом размещении предприятий в пункте r , $\lambda(2) = 1$; $\mathcal{E}_{j_1 j_2}^r$ — АЭ пары предприятий j_1 и j_2 .

Принципиальный недостаток данного подхода в том, что неизвестен вид весовой функции $\lambda(m^r)$, поскольку неизвестно, как соотносятся агломерационные экономии от пары предприятий и от совместного строительства и эксплуатации большего их количества.

Таким образом, все методы описания АЭ первой группы либо имеют неустраняемые недостатки, либо приводят к моделям с существенно нелинейными функционалами.

Рассмотрим теперь методы второй группы. В них в качестве аргументов функции АЭ выступают дополнительные булевы переменные, вызывающие размещение комбинаций производств. При этом в модели сохраняются переменные, которые отражают размещение одиночных производств (и которые правомерно называть основными). Наличие двух типов характеристик размещения одних и тех же объектов вызывает необходимость их согласования, что приводит к появлению в задаче дополнительных логических ограничений.

В результате такого усложнения модели оказывается возможным — в отличие от методов первой группы — отобразить АЭ в линейно-целочисленном виде.

Работа [10] является первой, где была высказана идея введения в модель дополнительных булевых переменных для отображения АЭ. Возможности предлагаемого аппарата были продемонстрированы на примере отраслевых моделей развития и размещения производства. Однако АЭ проявляется не только (и не столько) в рамках одной отрасли. Его следует рассматривать прежде всего как межотраслевую проблему. Следующим закономерным шагом стало включение агломерационного блока в межотраслевые модели, что было осуществлено в [4] на примере модели пространственной структуры территориально-производственных комплексов. Метод [4] имеет важное преимущество — линейно-целочисленное описание фактора агломерации, но и сильное ограничение: он не позволяет рассматривать любые комбинации производств. В частности, если среди выделенных комбинаций имеются вложенные, т. е. вида $\{1, 2\}$, $\{1, 2, 3\}$, $\{1, 2, 3, 4\}$ и т. п., то образуются «лишние» эффекты вследствие повторного счета эффектов вложенных комбинаций. Поясним это на примере.

Пусть в пункте разместились комбинация из трех предприятий $\{1, 2, 3\}$, АЭ которой Θ_{123} . Известны также АЭ Θ_{12} , Θ_{13} , Θ_{23} . Тогда эффект комбинации $\{1, 2, 3\}$ будет рассчитан как

$$\Theta_{123} = \Theta_{12} + \Theta_{13} + \Theta_{23} + \Theta_{123}.$$

Нетрудно видеть, что эффекты Θ_{12} , Θ_{13} , Θ_{23} являются лишними, причем появились они благодаря вложенным комбинациям $\{1, 2\}$, $\{1, 3\}$, $\{2, 3\}$.

Следовательно, обсуждаемая попытка моделирования агломерационного фактора с помощью аппарата дополнительных булевых переменных недостаточно совершенна и нуждается в дальнейшем развитии.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА *

Продemonстрируем его на примере следующей упрощенной задачи размещения.

Пусть заданы перечень размещаемых в регионе производств и все допустимые пункты размещения. Из производств сформированы всевозможные комбинации с известным АЭ, как положительным, так и отрицательным. Требуется разместить объекты по пунктам с минимальными суммарными затратами, учитывая эти АЭ.

Введем следующие обозначения: j — индекс предприятия, $j = 1, \dots, J$; r — индекс пункта, $r = 1, \dots, R$; p — индекс комбинации, $p = 1, \dots, P$; U_p — множество индексов предприятий, образующих комбинацию p ; M_p — количество предприятий в комбинации p ; x_j^r — булева переменная, равная 1, если предприятие j размещается в пункте r (основные переменные); y_p^r — булева переменная, равная 1, если в оптимальном плане комбинация p размещается в r (дополнительные переменные); c_j^r — затраты при размещении предприятия j в r ; Θ_p^r — АЭ (положительный или отрицательный) комбинации p в r .

* Разработан авторами совместно с Ю. Ю. Финкельштейном.

Тогда математическая запись модели будет следующая. Целевая функция — минимум суммарных затрат на размещение предприятий с учетом агломерационных эффектов комбинаций

$$\sum_{r,j} c_j^r x_j^r - \sum_{r,p} \partial_p^r y_p^r \rightarrow \min, \quad (1)$$

стандартное ограничение $\sum_r x_j^r = 1, j = 1, \dots, J,$

дополнительные ограничения для $\partial_p^r > 0$

$$\sum_{j \in U_p} x_j^r \geq M_p y_p^r, \quad r = 1, \dots, R, \quad p = 1, \dots, P, \quad (2)$$

$$y_p^r + \frac{1}{J - M_p} \sum_{j \in U_p} x_j^r \leq 1, \quad r = 1, \dots, R, \quad p = 1, \dots, P, \quad (3)$$

для $\partial_p^r < 0$

$$\sum_{j \in U_p} x_j^r - \sum_{j \in U_p} x_j^r \leq M_p - 1 + y_p^r, \quad r = 1, \dots, R, \quad p = 1, \dots, P. \quad (4)$$

Назначение условий (2) — (3), относящихся к комбинациям, размещение которых дает экономию затрат, следующее: если комбинация p не размещается в пункте r , то необходимо, чтобы $y_p^r = 0$; если же p размещается в r , то y_p^r может быть 0 или 1. Действительно, если комбинация p не размещается в пункте r , то либо не все предприятия этой комбинации разместились в пункте, т. е. $\sum_{j \in U_p} x_j^r < M_p$, и тогда, благодаря

(2) $y_p^r = 0$; либо кроме предприятий комбинации p в пункте разместились и другие, т. е. $\sum_{j \in U_p} x_j^r > 0$, и тогда, согласно (3), $y_p^r = 0$. Если ком-

бинация p размещается в пункте r , то $\sum_{j \in U_p} x_j^r = M_p$, $\sum_{j \in U_p} x_j^r = 0$, и поэтому y_p^r может быть как 0, так и 1. Указанная неоднозначность устраняется за счет постановки задачи на минимум: в оптимальном решении $y_p^r = 1$, поскольку АЭ — положительный.

Смысл ограничений (4), выполняющихся для комбинаций, размещение которых в пункте вызывает перерасход затрат, таков: если комбинация p размещается в пункте r , то необходимо, чтобы $y_p^r = 1$, если p не размещается в r , то y_p^r может быть 0 или 1. Действительно, если комбинация p размещается в пункте r , то $\sum_{j \in U_p} x_j^r = M_p$, $\sum_{j \in U_p} x_j^r = 0$ и для выполнения (4) необходимо, чтобы $y_p^r = 1$. Если комбинация p не размещается в пункте r , то либо не все предприятия этой комбинации разместились в пункте, т. е. $\sum_{j \in U_p} x_j^r < M_p$, и, следовательно, y_p^r может быть

как 0, так и 1; либо кроме предприятий комбинации p в пункте r разместились и другие, таким образом, y_p^r может быть как 0, так и 1.

Постановка задачи на минимум снимает эту неопределенность: в оптимальном решении $y_p^r = 0$, поскольку АЭ — отрицательный.

Итак, предлагаемый подход обладает следующими особенностями.

1. С помощью дополнительных булевых переменных и логических ограничений АЭ отображается в удобном для реализации линейно-целочисленном виде.

2. Не ограничивается число размещаемых в каждом рассматриваемом пункте производств и их комбинаций.

3. Рассматриваются как положительные, так и отрицательные АЭ.

4. Допускаются любые комбинации производств (при фиксированных в расчетах мощностях отдельных предприятий).

Изложенный подход применен при построении модели размещения производства в Южном Таджикистане, состоящей из: отраслевого, ресурсного, инфраструктурного и агломерационного блоков.

В отраслевом блоке учитываются территориальная дифференциация затрат на производство продукции, обусловленная различиями в его условиях по пунктам региона, а также (при необходимости) транспортные издержки. Отраслевая специфика предприятий, отраженная в технико-экономических показателях размещения, с одной стороны, и внутрирайонные различия условий производства — с другой, вызывают тяготение предприятий к тем или иным пунктам при выборе которых не учитывается влияние остальных предприятий-претендентов.

В ресурсном блоке с помощью специально разработанного метода учитываются затраты на ресурсы, оценки которых скачкообразно изменяются с увеличением объема их потребления. (Затраты на ресурсы, оценки которых постоянны, включены в отраслевой блок.) Суммарная потребность предприятий в ресурсах рассчитывается с учетом уменьшения их расхода благодаря совместному размещению объектов.

В блоке инфраструктуры отражается ее влияние на размещение производства, состоящее в том, что: а) территориальная концентрация производств в пункте вызывает укрупнение обслуживающих их объектов инфраструктуры и, следовательно, удешевление продукции (услуг); б) устраняется дублирование в создании объектов одного и того же назначения.

В агломерационном блоке учитываются преимущества и недостатки совместного размещения предприятий.

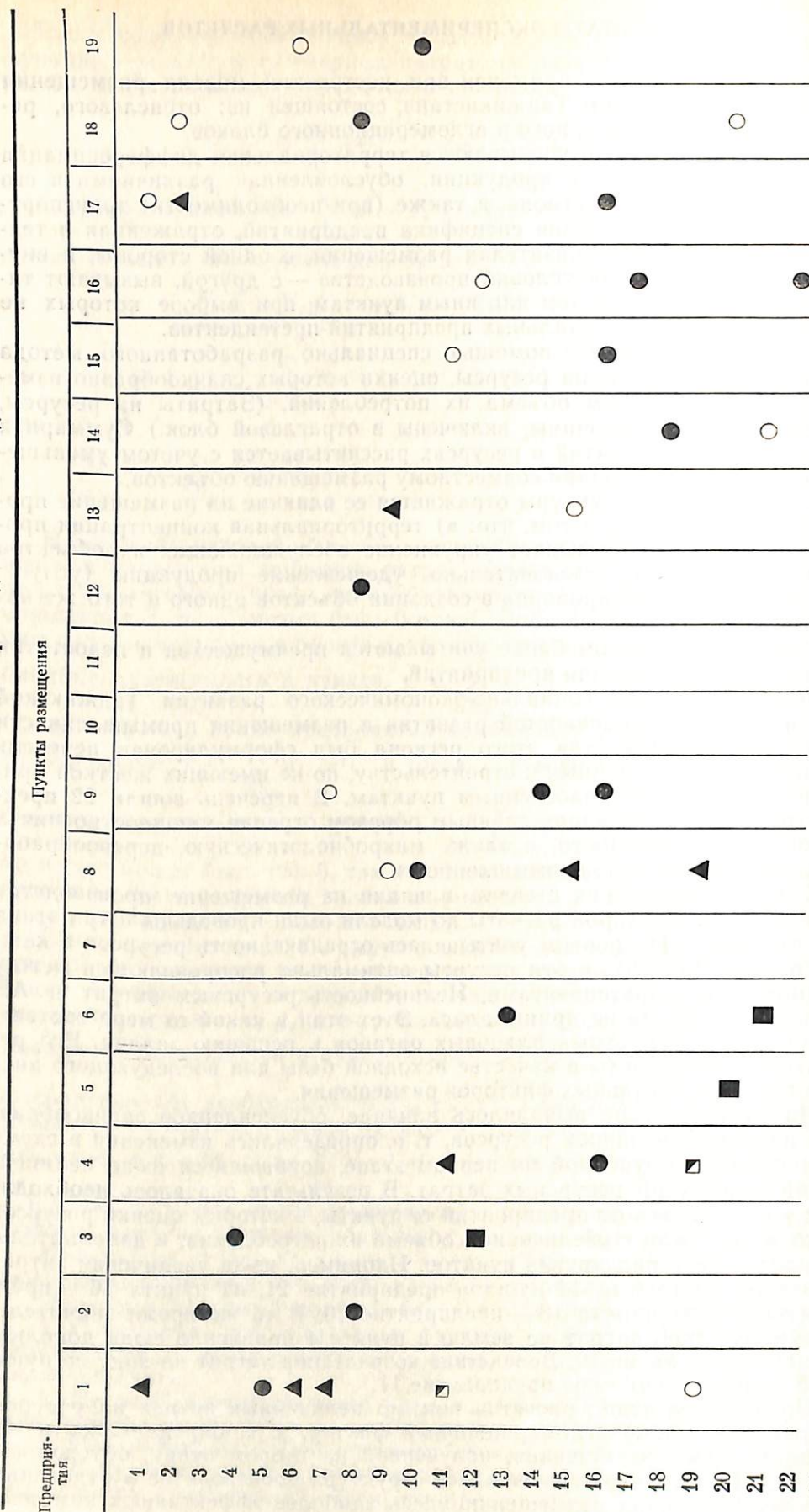
Исходя из задач социально-экономического развития Таджикской ССР в целом и особенностей развития и размещения промышленности на юге республики, для этого региона был сформулирован перечень предприятий, намеченных к строительству, но не имеющих жесткой привязки к какому-либо населенному пунктам. В перечень вошли 22 предприятия, представляющих главным образом отрасли машиностроения и легкой промышленности, а также микробиологическую, деревообрабатывающую и местную промышленность.

С целью выявления степени влияния на размещение производства тех или иных факторов расчеты по модели были проведены в три этапа (см. таблицу). На первом учитывалась ограниченность ресурсов в каждом пункте (из 19), и эти ресурсы оптимально распределялись между предприятиями-претендентами. Нелинейность ресурсных затрат и АЭ здесь во внимание не принималась. Этот этап в какой-то мере соответствует подходу местных плановых органов к решению задачи. Его результаты необходимы в качестве исходной базы для последующего анализа влияния остальных факторов размещения.

На втором этапе выявлялось влияние, обусловленное скачкообразным поведением оценок ресурсов, т. е. определялись изменения в схеме размещения, полученной на первом этапе, появившиеся из-за нелинейностей в функции ресурсных затрат. В результате оказалось необходимым «разгрузить» от предприятий те пункты, в которых оценки ресурсов резко возрастали с увеличением объема их потребления, и дополнительно «загрузить» ряд других пунктов. Например, из-за увеличения затрат на землю из пункта 14 «ушло» предприятие 21, из пункта 16 — предприятие 12, из пункта 18 — предприятие 20. В то же время значительное уменьшение затрат на землю в пункте 4 привлекло сюда дополнительно предприятие 19. Вследствие возрастания затрат на воду из пункта 15 «ушло» водоемкое предприятие 11.

На третьем этапе расчетов помимо нелинейных затрат на ресурсы учитывался также агломерационный фактор, т. е. определялись изменения в схеме размещения, полученной на втором этапе, обусловленные АЭ. В результате улучшалась структура производства в отдельных пунктах благодаря размещению здесь наиболее эффективных комбина-

Результаты оптимизации размещения новых промышленных производств в Южном Таджикистане



Обозначения: ○ — размещение при отсутствии ограничений ресурсов (промежуточное размещение); ● — влияние ограниченности ресурсов (окончательное размещение); ■ — размещение при учете затрат на ресурсы (промежуточное размещение); ▲ — влияние нелинейных затрат на ресурсы (окончательное размещение); ○ — размещение при учете затрат на ресурсы (промежуточное размещение); ■ — влияние нелинейных затрат на ресурсы (окончательное размещение); ▲ — влияние агрегационного фактора (окончательное размещение).

ций. Если после второго этапа расчетов в пункте 1 разместились предприятия, не создающие АЭ, то после третьего этапа в этом пункте сформировалась одна из выделенных комбинаций за счет перемещения сюда предприятий 1, 6, 7. Аналогичная ситуация в пункте 8, где разместилась другая комбинация за счет перевода сюда предприятий 15, 19. Размещение этих комбинаций в указанных пунктах оказалось эффективным, так как, с одной стороны, именно они создают наибольший АЭ, а с другой — в указанных пунктах оценки ресурсов ниже, чем во многих других, причем с увеличением объема потребления они не возрастают.

Расчеты осуществлялись на ЭВМ-1060 с использованием пакета прикладных программ целочисленного линейного программирования. Размерность задачи составила на третьем этапе 126 переменных и 87 ограничений; время решения — около 13 мин.

Анализ результатов оптимизационных расчетов позволил скорректировать имеющиеся представления об эффективности размещения производства в Южном Таджикистане. Как и следовало ожидать, вариант размещения, составленный на основе изолированных отраслевых оптимумов, является недопустимым: объемы ресурсов в пунктах не сбалансированы с потребностями размещаемых предприятий. Вариант, содержащийся в «Схеме развития и размещения производительных сил республики» оказался допустимым, но не оптимальным: ресурсы общего пользования нерационально распределены между предприятиями-предтендентами, не учитывается АЭ за счет их совместного размещения, игнорируется нелинейность ресурсных затрат. Устранение этих недостатков позволило найти вариант размещения, который по сравнению со схемой дает значительную (4%) экономию приведенных затрат. Расчеты показали практическую реализуемость и относительную простоту использования предложенного метода моделирования АЭ: проблемы нелинейности и комбинаторики (при значительной размерности задачи) удалось преодолеть, основываясь на методе линейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловская Л. В. Территориальная концентрация промышленности. Минск: Наука и техника, 1975.
2. Албегов М. М., Солодилов Ю. И. Метод увязки отраслевых и районных планов// Экономика и мат. методы. 1968. Т. IV. Вып. 3.
3. Завельский М. Г. Блок оптимальной районной планировки//Проблемы и методы оптимального территориально-производственного планирования. Т. II. М.: ЦЭМИ АН СССР, 1968.
4. Ларина Н. И. Учет эффекта агломерации в моделях ТПК//Территориально-производственные комплексы: вопросы структуры и развития. Новосибирск: ИЭ ОПП СО АН СССР, 1981.
5. Езерский В. И. Модель и формирование исходной информации для определения районной планировки Причулымья//Изв. СО АН СССР. Сер. обществ. наук. 1969. Вып. 3. № 11.
6. Александрович Я. С., Комлик В. И., Ладышев Г. К., Чечетт Г. В. К вопросу внутрирайонного размещения промышленного производства//Математические модели и методы в автоматизированных системах. Вып. 1. Минск: НИИЭММП при Госплане БССР, 1975.
7. Малов В. Ю. Учет нелинейных зависимостей в территориальных моделях//Моделирование формирования территориально-производственных комплексов. Новосибирск: Наука, 1976.
8. Арушанян И. И., Бандман М. К., Бельский В. З., Малов В. Ю., Михальченко Л. М. Нелинейная модель оптимизации пространственной структуры ТПК//Изв. СО АН СССР. Сер. обществ. наук. 1976. Вып. 1. № 1.
9. Система моделей оптимального планирования. М.: Наука, 1975.
10. Егоров Ю. И., Крючков В. Н. Формализация логических условий в производственных моделях отраслевого планирования//Оптимальное планирование развития и размещения отраслей промышленности. Ч. 1. Новосибирск: ИЭ ОПП СО АН СССР, 1972.

Поступила в редакцию
21 XI 1989