ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ 1990 Том 26, вып. 4

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рикун А. Д., Ширяк И. М.

(Москва, Свердловск)

Приводится математическая модель и пример расчетов «замкнутой» схемы экономического стимулирования ресурсосберегающих (или природоохранных) мероприятий, при которой плата за ресурсы используется для частичной компенсации затрат на ресурсосберегающие мероприятия.

Статья посвящена модификации известной схемы согласования интересов Центра и Подсистем в иерархической системе управления веерного типа [1] с тем, чтобы учесть присущую подсистемам ограниченность средств и нежелательность слишком резкого изменения условий их функционирования при переходе от административных к экономическим схемам управления. Изложенный ниже подход по существу является формализацией предлагаемых в [2, 3] схем стимулирования производственной и природоохранной деятельности. Аналогичная схема может использоваться для стимулирования ресурсосберегающей деятельности различной природы. Поэтому в первой части статьи рассматривается общая модель, а во второй — пример ее применения к разработке нормативов стимулирования водоохранной деятельности промышленных предприятий.

1. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ

В схеме согласования интересов Центра и Подсистем, которая нередко используется для определения показателей платы за ресурс (сброс загрязняющих веществ (ЗВ) [4]), предполагается, что Центр заинтересован в максимизации показателя $G(x)$ (суммарного дохода, предотвращенного ущерба и т. д.) при линейных ограничениях (2) — (3) на общие ресурсы в Подсистемах (вектор R) и технологические условия их функционирования

$$G(x)=\sum_{i=1}^{n} c_i(x_i)\to\max, \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_i x_i \leqslant R, \tag{2}$$

$$x_i\in X_i\subset R_+^{n_i},\ i=1,\ \ldots,\ n. \tag{3}$$

В случае совпадения интересов Подсистем $(\tilde{c}_i(x_i))$ и Центра $(\tilde{c}_i(x_i)=c_i(x_i))$, а также строгой вогнутости функций c_i Центр может добиться своей цели (оптимального значения показателя $G^*=G(x^*)$), назначая плату за общие ресурсы, равную двойственным оценкам λ^* [5]

$$x_i^*=\operatorname{argmax}\{c_i(x_i)-(\lambda^*)'A_i x_i\mid x_i\in X_i\},\ i=1,\ \ldots,\ n. \tag{4}$$

Важный тезис противников платы за ресурсы, приложимый и к схеме (1) — (4), состоит в следующем. Чтобы рычаги платы за ресурсы оказались действенными, величина платы должна быть существенной. Это означает, что при переходе к ресурсам, «платным» по схеме (1)—(4), подсистемам необходимо изыскать достаточно большой дополнительный объем средств, равный (λ^*, R). Скачкообразное (на (λ^*, R)) изменение производственных расходов может в конечном итоге неблагоприятно сказаться на конечном потребителе производимой продукции. Кроме того, значительный уровень экономического вмешательства в деятельность подсистем приводит к таким (неотражаемым данной моделью) последствиям, как снижение заинтересованности производителей в конечном результате.

Более перспективным представляется введение обратной связи в схему управления ресурсосберегающей деятельностью [6], когда плата за использование ресурсов (загрязнение среды и т. д.) не отторгается полностью от производителей, а возвращается к ним в качестве оплаты конечного результата. Ее формы могут быть различными — от финансирования мероприятий по внедрению ресурсосберегающих и экологически чистых технологий [7] до «структурной перестройки системы закупочных цен» [8] при введении платы за воду.

В настоящее время имеются примеры реализации такого подхода (закон Тэйлора о регулировании пастбищ, принятый в США в 1934 г. [3]), где предложена схема регулирования нагрузки на природные экосистемы животноводческой отрасли. Региональный орган брал с фермеров налог, пропорциональный количеству голов в стаде, а средства от этих налогов возвращались фермерам в качестве субсидий к закупочной цене на мясо, реализацию программ поддержания и улучшения пастбищ. Таким образом стимулировались наиболее эффективно функционирующие (как в экономическом, так и в экологическом отношении) производители.

Рассмотрим теперь вариант формального описания подобной иерархической системы управления с «обратной связью» для определения оптимальных (с точки зрения органа управления — Центра) нормативов стимулирования ресурсосберегающей деятельности Подсистем.

Пусть Центр описывается соотношениями (1)—(3). Подсистемы стремятся максимизировать свои целевые функции $\tilde{c}_i(x_i)$, распоряжаясь вектором $x_i \in X_i$.

Предположим, что плата за использование ресурсов R, общих для Подсистем, т. е. $\gamma(R)$, идет частично на централизованные нужды (в объеме ΔK, например, в госбюджет и т. д.), а частично, в объеме $\gamma(R)-\Delta K$, возвращается к Подсистемам в качестве стимула за их вклад в конечный результат Центра — $\sum_{i=1}^{n} c_i(x_i)$.

Полагая, что плата за пользование ресурсами линейна: $\gamma(R) = (\gamma, R) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i r_i$, а вознаграждение Подсистем пропорционально их вкладу в общий результат, получим следующие соотношения, описывающие выбор $\overset{0}{x}_i = x_i(\gamma, \omega)$ Подсистем

$$\overset{0}{x}_i = \operatorname{argmax}\{\tilde{c}_i(x_i) + \omega c_i(x_i) - (\gamma, A_i x_i) \mid x_i \in X_i\}. \quad (5)$$

Здесь $\omega c_i(x_i)$ — отчисления Центра Подсистеме i пропорционально ее вкладу в «результат» Центра $G(x)$. Центр должен так выбрать параметры $\gamma = \{\gamma_1, \ldots, \gamma_m\}' \in R^m$, ω, чтобы соответствующие решения $\overset{0}{x}_i$ Подсистем (5) удовлетворяли бы следующим условиям:

баланс общих ресурсов

$$\sum_{i=1}^{n} A_i \overset{0}{x}_i \leqslant R; \quad (6)$$

баланс потоков финансовых средств от Подсистем к Центру и обратно

$$\left(\gamma, \sum_{i=1}^{n} A_i \overset{0}{x}_i\right) = \Delta K + \omega \sum_{i=1}^{n} c_i (\overset{0}{x}_i); \tag{7}$$

нормативы стимулирования (ω, γ) Центр выбирает, стремясь максимизировать свою целевую функцию $G(\overset{0}{x})$, зависящую от решений $\{\overset{0}{x}_i\}_{i=1}^{n}$, принимаемых Подсистемами согласно (5).

Отличие схемы (5)—(7), впервые рассмотренной в [6], от многочисленных и хорошо известных моделей согласования интересов Центра и Подсистем [1] состоит в наличии условия «сбалансированности штрафов и поощрений» (7).

Понятно, что если интересы Центра и Подсистем не совпадают, то $G(\overset{0}{x}) \leqslant G(x^*)$ или даже возможны ситуации, когда параметры (γ, ω), удовлетворяющие условиям (5)—(7), не существуют.

Вначале рассмотрим случай совпадающих интересов Центра и Подсистем.

Теорема 1. *Пусть в задаче (1)—(3) множества X_i выпуклы, $\{x_i^*\}_{i=1}^{n}$— ее единственное решение, удовлетворяющее условиям Куна — Таккера с двойственными оценками ограничений (2), равными λ^*.*

Если целевые функции Центра $c_i(x_i)$ и Подсистем $\tilde{c}_i(x_i)$, $i=1, \ldots, n$, строго вогнуты, в некоторой окрестности x_i^* непрерывно дифференцируемы и совпадают друг с другом, то при выполнении неравенства

$$\Omega = \frac{G(x^*) - \Delta K}{G(x^*) - (\lambda^*, R)} > 0 \tag{8}$$

решение $\{\overset{0}{x}_i\}_{i=1}^{n}$ задачи (5)—(7) существует и совпадает с оптимальным: $\overset{0}{x}_i = x_i^*$ при

$$\omega = \frac{(\lambda^*, R) - \Delta K}{G(x^*) - (\lambda^*, R)} = \Omega - 1, \tag{9}$$

$$\gamma = \lambda^* \frac{G(x^*) - \Delta K}{G(x^*) - (\lambda^*, R)} = \Omega\lambda^*. \tag{10}$$

Замечания. 1. Условие равенства $\tilde{c}_i(x_i) = c_i(x_i)$ в теореме можно ослабить, потребовав эквивалентности целей Центра и Подсистем в виде

$$x_i^* = \operatorname{argmax} \{\tilde{c}_i(x_i) - (\lambda^*, A_i x_i) \mid x_i \in X_i\}, \quad i = 1, \ldots, n, \tag{11}$$

однако при этом (8) необходимо ужесточить, потребовав $\Omega > 1$.

2. Условие (строгой) вогнутости в теореме 1 представляется непомерно ограничительным для практических задач, поскольку наиболее интересным является линейный случай. Теорема 1 (или аналогичные (9)—(10) соотношения (1) в [6]) применима при линейности функций c_i, $\tilde{c}_i$, если не требовать точного выполнения ограничений (6) (зачастую такие ограничения достаточно условны). Возможная ошибка в выполнении (6) в важном случае $n \gg m$ оказывается пренебрежимо малой [6].

3. Как видно из (9)—(10), допустимы различные варианты знаков ΔK, ω: $\Delta K < 0$ — соответствует ситуации, когда Центр получает дополнительные дотации для ресурсосберегающих мероприятий; $-1 < \omega < 0$ — если, например, при значительных отчислениях в госбюджет ΔK региональный орган вынужден не только стимулировать ресурсосберегающую деятельность (за счет $\gamma > 0$), но и облагать ее налогами.

4. Для доказательства теоремы 1 заметим, что решения (5) и (4) совпадают, поскольку допустимые множества этих задач одинаковы, а целевые функции различаются положительным множителем Ω, $1+\omega = \Omega$, $\gamma = \lambda^*\Omega$, который определен так, чтобы выполнялось условие (7).

5. При очень значительных ΔK (в (9) $\omega \leqslant -1$) решения, удовлетворяющего условиям (2)—(3), (5)—(7), может не существовать.

Рассмотрим задачу определения нормативов (ω, γ), удовлетворяющих (5)—(7) при несовпадении интересов Центра и Подсистем ($\tilde{c}_i \neq c_i$).

Действуя в рамках (5) — (7), при $\Delta K=0$ Центр всегда может добиться результата $G(\overset{0}{x})$

$$G(\overset{0}{x}) \geqslant G(\widetilde{x}), \tag{12}$$

где $\widetilde{x}$ — решение задачи оптимизации суммарного дохода подсистем $\sum\limits_{=1}^{n} \widetilde{c}_i(x_i)$ при ограничениях (2), (3). Случай $G(x)=G(\widetilde{x})$ возможен только, если двойственные оценки ограничений (2) $\widetilde{\lambda}=0$; при этом $\gamma=0$, $\omega=0$.

Проанализируем теперь условия существования решения задачи (5) — (7). Обозначим $\widetilde{\lambda}$ двойственные оценки (2) задачи максимизации $G(\overset{0}{x}) \geqslant \sum\limits_{c=1}^{n} \widetilde{c}_i(x_i)$ на множестве (2) — (3).

Теорема 2. *Пусть в* (1) — (3) *допустимая область выпукла, активные ограничения в* x^* *линейно независимы, а непрерывно дифференцируемые функции* $c_i(x_i)$, $\widetilde{c}_i(x_i)$ *строго вогнуты. Если в точках* x^*, $\widetilde{x}$ *выполняются условия одной из систем неравенств*

$$\Delta K \leqslant \left(\widetilde{\lambda},\ \sum_{i=1}^{n} A_i \widetilde{x}_i\right),\ \left(\lambda^*,\ \sum_{i=1}^{n} A_i x_i^*\right) < G(x^*) \tag{13}$$

либо

$$\Delta K \geqslant \left(\widetilde{\lambda},\ \sum_{i=1}^{n} A_i \widetilde{x}_i\right),\ \left(\lambda^*,\ \sum_{i=1}^{n} A_i x_i^*\right) > G(x^*),$$

то задача (5) — (7) *имеет решение.*

Приведем схему доказательства теоремы 2.

Пусть $\{x_i(\omega)\}_{i=1}^{n}$, $\lambda(\omega)$ — решение и двойственные оценки ограничений (2) для задачи максимизации $\widetilde{G}(x)+\omega G(x)$ на множестве (2), (3).

Нетрудно доказать что при $\gamma \in \lambda(\omega)$, $\omega \geqslant 0$ решения $x_i(\omega)$ удовлетворяют условиям (5), (6), а кроме того, график Γ_λ отображения $\lambda(\omega)$ является связным множеством на любом отрезке $\omega \in [0, \omega_1]$. В силу непрерывности и однозначности (при больших ω) отображений $x(\omega)$, $\lambda(\omega)$: $(x^*, \lambda^*) = \lim\limits_{\omega\to\infty} (x(\omega), \lambda(\omega)/\omega)$ и, по определению, $\widetilde{x}=x(0)$, $\widetilde{\lambda} \in \lambda(0)$. Поэтому из (13) следует, что функция $\Delta(\omega, \gamma) = (\gamma, \sum A_i x_i(\omega)) - \omega G \times$ $\times (x(\omega)) - \Delta K$ принимает в точках $\omega=0$, $\gamma=\widetilde{\lambda}$ и $\omega=\omega_1$, $\gamma(\omega_1)$ при достаточно больших ω_1 значения с разными знаками. Поскольку $\Delta(\omega, \gamma)$ непрерывно на связном множестве Γ_λ, найдутся $\overset{0}{\omega} \geqslant 0$, $\overset{0}{\gamma} \in \lambda(\overset{0}{\omega})$ такие, что $\Delta(\omega, \overset{0}{\gamma})=0$, т. е. $(\overset{0}{\omega}, \overset{0}{\gamma})$ удовлетворяют условиям (5) — (7).

Замечание. Как уже говорилось, решение $\overset{0}{x}$, на которое может претендовать Центр, действуя в рамках (5) — (7), таково, что $G(\widetilde{x}) \leqslant$ $\leqslant G(\overset{0}{x}) \leqslant G(x^*)$. Отметим, что схема (5) — (7) не единственно возможная — она соответствует случаю «равноправия» Подсистем с точки зрения Центра. Можно рассмотреть ситуации, когда Центр использует несколько более общую политику, выплачивая Подсистемам субсидии $\omega_i c_i(x_i)$.

В этом случае соотношения (5) — (7) примут вид

$$\hat{x}_i = x_i(\omega_i, \gamma) = \operatorname{argmax} \{\widetilde{c}_i(x_i) + \omega_i c_i(x_i) - (\gamma, A_i x_i) \mid x_i \in X_i\}, \tag{14}$$

$$\left(\gamma,\ \sum_{i=1}^{n} A_i x_i\right) = \Delta K + \sum_{i=1}^{n} \omega_i c_i(\hat{x}_i),\ \sum_{i=1}^{n} A_i \hat{x}_i \leqslant R. \tag{15}$$

Очевидно, что если (5) — (7) имеет решение, то разрешима (14), (15) и $G(\hat{x}) \geqslant G(\overset{0}{x})$.

Отметим, что условия существования решений системы (14), (15) также даются теоремой 2, при этом Центр выбирает из этих решений значение $\widehat{\omega_i}\}_{i=1}^{n}, \gamma)$, при которых величина $G(x)$ максимальна. Как показывает приводимый ниже пример, в ряде практически важных случаев Центру удается «полностью» добиться своей цели $x_i(\hat{\omega}_i, \hat{\gamma}) = x_i^* \forall i = 1, \ldots, n$.

2. МОДЕЛЬ СТИМУЛИРОВАНИЯ ВОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

До последнего времени реализация водоохранных мероприятий носила преимущественно отраслевой характер. Это приводило (и приводит) к недостаточной эффективности использования значительных средств, затрачиваемых на эти цели. Очевидна необходимость перемещения центра тяжести по координации природоохранной деятельности на региональный уровень (см., например, [7]) путем создания региональных фондов ее стимулирования, формируемых за счет платежей предприятий за использование природных ресурсов и сброс загрязняющих веществ. Далее орган управления такого регионального фонда будем называть Центром. Его цель — минимизация суммы оценки ущерба (G) [9] от загрязнения водной среды предприятиями и затрат на водообеспечение в системе. Цель Подсистем (предприятий) — минимизация суммарных издержек на водоохрану. Задачу Центра рассмотрим в агрегированной постановке [10], поскольку число предприятий в регионе возможно весьма большое, а нормативы платы за сброс отходов не могут быть индивидуальными.

Для упрощения опишем лишь случай предприятий, непосредственно сбрасывающих загрязняющие вещества (ЗВ) в водный объект (при этом часть средств из отчислений ΔK может использоваться Центром на реализацию общесистемных водоохранных мероприятий, например реконструкцию очистных сооружений городской канализации и т. д.). Наша цель — определить нормативы γ, $\{z_r\}$, $\omega_{\beta r}$, где γ — плата за сброс единицы приведенной массы ЗВ [9]; z_r — плата за забор единицы свежей воды в зоне (районе) r региона; $\omega_{\beta r}$ — доля текущих затрат предприятия отрасли β, $\beta \in 1, \ldots, B$ района r, $r=1, \ldots, R$, которую погашает региональный Центр из своих средств (точнее, за счет выплат тех предприятий, которые продолжают сбрасывать ЗВ). Здесь термин «отрасль» применяется условно для выделения предприятий со сходными вариантами обработки и повторного использования сточных вод. Таким образом, предполагается, что в рамках каждой отрасли β можно задать m, $j=1, \ldots, m$, типовых вариантов развития водохозяйственных систем (ВХС) предприятий, так что параметры ВХС зависят лишь от полного (технологического) расхода используемой воды.

В соответствии с идеей «модульного» подхода [11, 12] все предприятия (отрасли β зоны r) разбиваются на группы с сопоставимыми технологическими расходами, так что внутри каждой группы i, $i=1, \ldots, I$, показатели функционирования ВХС — свежее водопотребление $Q_{ij}^{\beta r}$ (тыс. м³/год), расход приведенной массы на выходе $M_{ij}^{\beta r}$ (т/год), капитальные $K_{ij}^{\beta r}$ (тыс. руб.) и эксплуатационные затраты $Э_{ij}^{\beta r}$ (тыс. руб/год) можно считать постоянными для каждого из $N_i^{\beta r}$ предприятий (типа i, β, r). Кроме того, в рамках данного подхода предполагается аддитивность затрат при переходе от варианта j к l (если $K_{ij}^{\beta r} < K_{il}^{\beta r}$, то капитальные затраты предприятия по развитию ВХС до уровня l составят $K_{il}^{\beta r} - K_{ij}^{\beta r}$).

Таким образом, задачу регионального Центра, стремящегося минимизировать G — сумму ущерба от сброса ЗВ и затрат на водообеспечение в регионе всех $N = \sum_{\beta=1}^{B} \sum_{r=1}^{R} \sum_{i=1}^{I} N_i^{\beta r}$ предприятий — можно записать

$$G(\varepsilon) = \sum_{\beta=1}^{B} \sum_{r=1}^{R} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{m} g_0 \sigma_r N_i^{\beta r} M_{ij}^{\beta r} \varepsilon_{ij}^{\beta r} + \sum_{r=1}^{R} c_r Q_r(\varepsilon) \to \min, \tag{16}$$

$$T_{\Sigma}(\varepsilon)=\sum_{\beta=1}^{B}\sum_{r=1}^{R}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{m}N_i^{\beta r}T_{ij}^{\beta r}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\overline{T}_{\Sigma}-\Delta K, \tag{17}$$

$$T_{\beta}(\varepsilon)=\sum_{r=1}^{R}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{m}N_i^{\beta r}T_{ij}^{\beta r}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\overline{T}_{\beta},\ \beta=1,\ldots,B, \tag{18}$$

$$T_{r}(\varepsilon)=\sum_{\beta=1}^{B}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{m}N_i^{\beta r}T_{ij}^{\beta r}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\overline{T}_{r},\ r=1,\ldots,R, \tag{19}$$

$$Q_{r}(\varepsilon)=\sum_{\beta=1}^{B}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{m}N_i^{\beta r}Q_{ij}^{\beta r}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\overline{Q}_{r},\ r=1,\ldots,R, \tag{20}$$

$$M_{r}(\varepsilon)=\sum_{\beta=1}^{B}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{m}N_i^{\beta r}M_{ij}^{\beta r}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\overline{M}_{r},\ r=1,\ldots,R, \tag{21}$$

$$\sum_{j=1}^{k}\varepsilon_{ij}^{\beta r}\leqslant\sum_{j=1}^{k}\overset{0}{\varepsilon}{}_{ij}^{\beta r},\ k=1,\ldots,m-1,\ i=1,\ldots,I,\ \beta=1,\ldots,B,\ r=1,\ldots,R, \tag{22}$$

$$\sum_{j=1}^{m}\varepsilon_{ij}^{\beta r}=1,\ i=1,\ldots,I,\ \beta=1,\ldots,B,\ r=1,\ldots,R, \tag{23}$$

$$\varepsilon_{ij}^{\beta r}\geqslant 0,\ i=1,\ldots,I,\ \beta=1,\ldots,B,\ r=1,\ldots,R,\ j=1,\ldots,m. \tag{24}$$

В целевой функции (16) первое слагаемое соответствует оценке ущерба от сброса приведенной массы загрязнений в регионе (g_0 — нормативная оценка ущерба, σ_r — весовые коэффициенты различных водохозяйственных участков [9]); $\sum_{r=1}^{R}c_rQ_r(\varepsilon)$ — затраты (для упрощения линейные) на обеспечение потребления свежей воды на уровне $Q_r(\varepsilon)$ в районе r ($Q_r(\varepsilon)$ определяются по (20)).

Переменные $\varepsilon_{ij}^{\beta r}$ имеют смысл доли от общего числа $N_i^{\beta r}$ предприятий отрасли β, в районе r, группе i, которым следует применять технологию j очистки и повторного использования воды. Параметры

$$T_{ij}^{\beta r}=\frac{1}{\Delta t}\left\{\left|K_{ij}^{\beta r}-\overset{0}{K}{}_i^{\beta r}\right\}+Э_{ij}^{\beta r}\right.$$

— усредненные за период планирования Δt годовые затраты предприятия; $\overset{0}{K}{}_i^{\beta r}=\sum_{j=1}^{m}K_{ij}^{\beta r}\overset{0}{\varepsilon}{}_{ij}^{\beta r}$ — существующие фонды ВХС предприятий; $\overset{0}{\varepsilon}{}_{ij}^{\beta r}$ — имеющееся распределение предприятий по вариантам ВХС.

Эти варианты подобраны так, что с ростом $j=1,\ldots,m$ увеличиваются затраты $K_{ij}^{\beta r}$, $Э_{ij}^{\beta r}$, но улучшаются «экологические показатели» $M_{ij}^{\beta r}$, $Q_{ij}^{\beta r}$ (см. табл. 1). Таким образом, (22) гарантирует преемственность («прогресс») в развитии ВХС каждого предприятия группы i, β, r.

Параметр ΔK (17) — суммарные отчисления в госбюджет и на другие «межсистемные» нужды в регионе.

Общесистемные ограничения (17)—(21) — это ограничения на допустимый уровень текущих затрат (по региону в целом, отраслям и районам) на потребление воды и сбросы загрязнений в каждом районе $r=1,\ldots,R$. Подсистемой в данном случае является группа из $N_i^{\beta r}$ «однородных» предприятий с ограничениями (22)—(24) на уровень водопотребления и сброса загрязнений. Множества $\varepsilon_i^{\beta r}=\{\varepsilon_{ij}^{\beta r}\}_{j=1}^{m}$, удовлетворяющие (22)—(24), обозначим $E_i^{\beta r}$.

Таблица 1

Параметры вариантов ВХС предприятий

Показатели	Группа i											
	1				2				3			
	Технология, j											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Q_{ij}, тыс. м^3/сут	0,1	0,1	0,04	0,01	2,0	1,9	0,78	0,21	22,5	16,3	2,6	1,4
M_{ij}, т/год	48	47,5	41,6	4,58	960	934	834	85,6	12 000	10 400	5100	0,0
K_{ij}, тыс. руб.	0,07	0,08	28,5	171	0,58	0,73	120	171	2,73	459	757	1031
$Э_{ij}$, тыс. руб/г	0,01	0,01	3,3	23	0,07	0,09	9,86	23	0,27	91,6	186	237

Предполагается, что в условиях хозрасчета предприятия будут стремиться минимизировать свои усредненные (за период Δt) издержки на водоохрану, т. е. выбирать $\widetilde{\varepsilon}_i^{\beta r} = \{\widetilde{\varepsilon}_{ij}^{\beta r}\}_{jm}^{=1}$

$$\widetilde{\varepsilon}_i^{\beta r} = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_{ij}^{\beta r} \left(T_{ij}^{\beta r} + \gamma g_0 \sigma_r M_{ij}^{\beta r} + z_r Q_{ij}^{\beta r} - \omega_{\beta r} T_{ij}^{\beta r}\right) \mid \varepsilon_i^{\beta r} \in \mathrm{E}_i^{\beta r} \right\}. \quad (25)$$

В (25) удельная плата за сброс единицы приведенной массы в районе r равна $\gamma g_0 \sigma_r$. Предполагается, что часть $\omega_{\beta r}$ текущих затрат $T_{ij}^{\beta r} = \frac{1}{\Delta t}\{\Delta K_{ij}^{\beta r} - \overset{0}{K}{}_i^{\beta r}\} + Э_{ij}^{\beta r}$ погашается Центром. При этом в данной модели (7) принимает форму

$$\sum_{\beta=1}^{B} \sum_{r=1}^{R} \omega_{\beta r} \widetilde{T}_{\beta r} + \Delta K = \gamma g_0 \sum_{r=1}^{R} \sigma_r \widetilde{M}_r + \sum_{r=1}^{R} z_r Q_r(\widetilde{\varepsilon}), \quad (26)$$

где $\widetilde{M}_r = M_r(\widetilde{\varepsilon})$ определяется по 21;

$$\widetilde{T}_{\beta r} = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{m} T_{ij}^{\beta r} N_i^{\beta r} \widetilde{\varepsilon}_{ij}^{\beta r}.$$

Обозначив через $\varepsilon^* = \{\overset{*}{\varepsilon}{}_{ij}^{\beta r}\}$, $\lambda_\Sigma^*, \lambda_\beta^*, \lambda_r^*, \mu_r^*, q_r^*$ оптимальное решение (16)—(24) и двойственные оценки ограничений (17)—(21), получим условия оптимальности для «почти всех» из BRI (кроме $1+B+3R$ [6]) решений $\overset{*}{\varepsilon}{}_i^{\beta r}$ подсистем

$$\overset{*}{\varepsilon}{}_i^{\beta r} = \arg\min_{\mathrm{E}_i^{\beta r}} \left\{ \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_{ij}^{\beta r} \left[M_{ij}^{\beta r} (g_0 \sigma_r + \mu_r^*) + (\lambda_\Sigma^* + \lambda_\beta^* + \lambda_r^*) T_{ij}^{\beta r} + (c_r + q_r^*) Q_{ij}^{\beta r} \right] \right\}. \quad (27)$$

Отметим, что исходная модель (16)—(24) не является точной, так как в ней, в частности, предполагается идентичность параметров ВХС всех $N_i^{\beta r}$ предприятий каждой группы $i\beta r$. Однако при разумной схеме агрегирования (разбиения всех предприятий на группы) решение (27) может быть весьма точным [10]. Поэтому ниже будем называть решение (27) «точным» без оговорок о величине возможной погрешности.

Запишем теперь условия точной (до $O((3R+B)/BRI)$) согласованности интересов Центра и Подсистем $(G(\widetilde{\varepsilon}) \approx G(\varepsilon^*))$

$$\frac{1-\omega_{\beta r}}{\gamma g_0 \sigma_r} = \frac{\lambda_\Sigma^* + \lambda_\beta^* + \lambda_r^*}{g_0 \sigma_r + \mu_r^*}, \quad \frac{z_r}{\gamma g_0 \sigma_r} = \frac{c_r + q_r^*}{g_0 \sigma_r + \mu_r^*}. \quad (28)$$

Несложные преобразования (28) с учетом баланса потоков среднегодовых денежных средств (26) позволяют в явном виде выразить па-

Таблица 2

Значение параметров платы за сброс загрязняющих веществ (γg_0) и уровня стимулирования водоохранных мероприятий (ω)

Вариант	Показатели	ΔK, тыс. руб/г							
		100	......	500	600	700	800	900	1000
I	M^*_Σ, т/г	5500	$M^*_\Sigma(\Delta K)$ — линейна	8300	9000	9800	12 000	14 600	17 300
	γg_0, руб/т	91,03	91,03	91,03	86,23	86,23	52,52	52,52	52,52
	ω	0,361	0,361	0,361	0,292	0,292	0,452	0,452	0,452
II	M^*_Σ, т/г	5200	$M^*_\Sigma(\Delta K)$ — линейна	7900	8600	9300	10 100	13 400	17 400
	γg_0, руб/т	93,96	93,96	93,96	93,96	93,96	89,77	47,34	47,34
	ω	0,351	0,351	0,351	0,351	0,351	0,264	—0,887	—0,887
III	M^*_Σ, т/г	4800	$M^*_\Sigma(\Delta K)$ — линейна	7600	8300	9000	9 900	13 100	17 600
	γg_0, руб/т	95,83	95,83	95,83	95,83	91,3	91,3	45,11	45,11
	ω	0,327	0,327	0,327	0,327	0,251	0,251	—1,03	—1,03

раметры плат за ресурсы γ, $\{z_r\}$ и стимулирования $\{\omega_{\beta r}\}$ через результаты решения задачи Центра (16)—(24), где $T^*_{\beta r} = \sum\limits_{i,j} N_i^{\beta r} T_{ij}^{\beta r} \varepsilon_{ij}^{\beta r}$. Величины $T_\Sigma^* = T_\Sigma(\varepsilon^*)$, $Q_r^* = Q_r(\varepsilon^*)$, $M_r^* = M_r(\varepsilon^*)$ определяются из (17), (20), (21)

$$\gamma g_0 = \frac{T^*_\Sigma + \Delta K}{\sum\limits_{r=1}^{R} \sigma_r \left\{ \sum\limits_{\beta=1}^{B} \frac{\lambda^*_\Sigma + \lambda^*_\beta + \lambda^*_r}{g_0\sigma_r + \mu^*_r} T^*_{\beta r} + M^*_r + \frac{c_r + q^*_r}{g_0\sigma_r + \mu^*_r} Q^*_r \right\}}, \tag{29}$$

$$\omega_{\beta r} = 1 - \gamma g_0 \sigma_r \frac{\lambda^*_\Sigma + \lambda^*_\beta + \lambda^*_r}{g_0\sigma_r + \mu^*_r}, \tag{30}$$

$$z_r = \gamma g_0 \sigma_r \frac{c_r + q^*_r}{g_0\sigma_r + \mu^*_r}. \tag{31}$$

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Приведем теперь пример расчета нормативов стимулирования γ, ω для гипотетического региона, одной отрасли (машиностроения) в случае $\sigma=1$, $c=0$ (индексы β, r по понятным причинам опущены).

Исходные данные к расчетам содержатся в табл. 1. Рассматривалось три группы предприятий: «мелкие» — с технологическим расходом $Q_1^{\text{т}}=0{,}1$ тыс. м^3/сут, $N_1=41$; «средние» $Q_2^{\text{т}}=2$ тыс. м^3/сут, $N_2=9$ и «крупные» $Q_3^{\text{т}}=25$ тыс. м^3/сут, $N_3=1$, и четыре варианта ВХС для каждой группы; $\Delta t=5$ лет.

Расчеты проводились для параметров $\overline{T}_\Sigma=1200$ тыс. руб/г и ΔK, меняющемся от 100 до 1000 тыс. руб/г. Рассматривалось три варианта, различающиеся уровнем существующего развития ВХС. В варианте 1 суммарные основные фонды $\overset{0}{K}_\Sigma=390$ тыс. руб., эксплуатационные затраты $\overset{0}{Э}_\Sigma=41{,}4$ тыс. руб/г; в варианте 2 $\overset{0}{K}_\Sigma=580$, $\overset{0}{Э}_\Sigma=101{,}4$; в варианте 3 $\overset{0}{K}_\Sigma=860$, $\overset{0}{Э}=142{,}6$ тыс. руб., тыс. руб/г.

Результаты расчетов — значения γg_0, ω и суммарного сброса $3B - M_\Sigma^*$ см. в табл. 2. Как видно, параметры γ, ω оказываются весьма устойчивыми. Это объясняется устойчивостью (в условиях данного примера) оптимального базиса задачи, так как из (29)—(30) легко убедиться, что γ, ω определяются лишь значением $\overline{T}_\Sigma = T_\Sigma^* + \Delta K$ и оптимальным базисом задачи (16)—(24). При неизменном базисе они не зависят от соотношения расходов на выплаты государству (ΔK) и затраты на водоохранные мероприятия T_Σ^*.

При очень высоком уровне отчислений ($\Delta K \geqslant 900$) региональный орган вынужден применять «антистимулирующую» политику ($\omega<0$). Если $\Delta K=1100$, в вариантах 2, 3 задача (16)—(24) не имеет допустимого решения.

В заключение авторы выражают благодарность В. Р. Письменскому, указавшему на работы [2, 3], К. Г. Гофману за полезные обсуждения основных положений [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Моисеев Н. Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
2. *Письменский В. Р.* Преодолеть стереотипы//Сов. Россия. 1987. 11 июня.
3. *Оуэн О. С.* Охрана природных ресурсов. М.: Колос, 1977.
4. *Гофман К. Г.* Экономическая оценка природных ресурсов в условиях социалистической экономики. М.: Наука. 1977.
5. *Лэсдон Л.* Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975.
6 *Рикун А. Д.* Математическая модель стимулирования природоохранной деятельности промышленных предприятий//Тез. докл. XII школы-семинара «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского н/Д ун-та, 1988.
7. *Гофман К. Г.* Хозяйственный механизм природопользования: пути перестройки//Экономика и мат. методы. 1988. Т. XXV. Вып. 3.

8. *Ушаков Е. П., Голуб А. А.* Плата за воду в системе хозяйственного механизма// Водные ресурсы: рациональное использование. М.: Экономика, 1987.
9. Типовая методика определения экономической эффективности и экономического стимулирования осуществления природоохранных мероприятий и экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды (проект). М.: ЦЭМИ АН СССР, 1987.
10. *Рикун А. Д.* Проблема агрегирования технико-экономической информации в крупномасштабных моделях планирования водоохранных мероприятий//Математические модели в управлении водными ресурсами. М.: Наука, 1988.
11. Методика оптимального планирования водоохранных мероприятий в бассейне реки. Свердловск: УралНИИводного хозяйства, 1988.
12. *Анищенко Л. Я., Стольберг Ф. В., Сухоруков Г. А.* Методика расчета комплекса водоохранных мероприятий при перераспределении стока//Водные ресурсы. 1982. № 1.

Поступила в редакцию
14 X 1988