

Управление количеством вредных веществ в атмосфере

Д.Е. Теплюков, А.Б. Усов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Одной из важнейших проблем современности является чрезмерный выброс углекислого газа в атмосферу. В статье предложена математическая модель системы контроля за выбросом углекислого газа в атмосферу. Модель является двухуровневой, иерархически организованной. В качестве субъекта управления нижнего уровня выступают промышленные предприятия, а в качестве субъекта верхнего уровня – государство или его уполномоченный орган. Все субъекты управления нижнего уровня стремятся только к максимизации своего выигрыша. Основной целью субъекта верхнего уровня является поддержания качества атмосферного воздуха в заданном диапазоне. Задача рассматривается в игровой постановке. Строится равновесие Штакельберга. Указан алгоритм построения, и он программно реализован. Дан анализ полученных результатов, сделан ряд выводов.

Ключевые слова: равновесие Штакельберга, двухуровневая иерархическая модель, ведущий, ведомый, углекислый газ, Росприроднадзор, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования.

Введение

В современном мире города, особенно мегаполисы — это центры развития технологий, бизнеса, промышленности. Однако, есть и негативные стороны такой высокой концентрации высоких технологий в городах. Речь идет о выбросах вредных веществ в атмосферу. Так, в частности, на долю городов приходится около 70% выбросов CO_2 [1].

Сам по себе углекислый газ не вреден для окружающей среды, даже наоборот, он является одним из главных элементов жизнедеятельности растений. Они поглощают его и перерабатывают в кислород.

Однако, если его становится слишком много, то он начинает играть роль тепловой изоляции для планеты, что усиливает влияние парникового

эффекта, а это, в свою очередь, повышает температуру планеты, что приводит к серьезному изменению климата.

Поэтому так важен контроль за выбросами CO_2 в атмосферу. В России такой контроль осуществляет федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор). Основой деятельности этой службы является инспекционный контроль объектов, которые своей деятельностью могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду.

В свою очередь, предприятие ведет свою деятельность, зачастую ориентированную на получение прибыли. В целом, без контроля федеральной службы по надзору в сфере природопользования, предприятие не заинтересовано во вложении средств в контроль и снижение уровня выброса CO_2 .

Целью моей работы является разработка системы поддержки Росприроднадзора в принятии мер по контролю выбросов CO_2 в атмосферу. В процессе контроля выбросов возникает проблема устойчивости системы, где Росприроднадзор стремится к соблюдению норм выбросов углекислого газа, а предприятие стремится к максимизации прибыли.

По ходу исследования будет рассмотрена математическая модель контроля и регулирования выбросов углекислого газа в атмосферу. Будет предложена программная реализация алгоритма Штакельберга [2, 3], а также проведен анализ полученных результатов и поиск оптимальных стратегий для данной модели.

Математическая постановка задачи

В ходе исследования была реализована двухуровневая иерархическая модель [4, 5] контроля за выбросами углекислого газа в атмосферу, включающая субъекты верхнего и нижнего уровня.



Рис.1. Двухуровневая модель регулирования выбросов углекислого газа в атмосферу

В качестве субъекта управления верхнего уровня (ведущего) выступает Росприроднадзор, а в качестве субъекта нижнего уровня (ведомого) – предприятие. Каждый из участников модели стремится к максимизации своего выигрыша. Для идентификации доходов и расходов ведущего и ведомого используются следующие целевые функции:

$$J_{\text{sup}}(D, C) = \sum_{i=1}^N E(D_i, C_i) \left[K + \frac{B}{1 + \frac{C_{\text{нач}} - C}{C_{\text{нач}}}} \right] - \sum_{i=1}^N \frac{D_i + C_i}{D_i} \rightarrow D \quad (1)$$

$$E(D_i, C_i) = \begin{cases} C_i \cdot p_1, & D \geq C \\ (C_i - D_i) \cdot p_2 + D_i \cdot p_1, & \text{иначе} \end{cases}$$

где D – управляющий параметр Ведущего, отвечающий за допустимую норму выброса углекислого газа предприятием в атмосферу, C –

управляющий параметр Ведущего, отвечающий за количество выбрасываемого углекислого газа предприятием после прохождения через очистительные сооружения, B – федеральные средства, K – капитал предприятия, β – доля траты средств на нужды производства, d – федеральный бюджет, идущий на исполнение деятельности Росприроднадзора, r – уровень риска предприятия, γ – уровень квалификации специалистов Росприроднадзора, N – количество агентов, p_1 – цена за сброс CO₂ без превышения нормы на единицу товара, p_2 – цена за сброс CO₂ выше нормы на единицу товара.

$$J_{ag}(D, C) = z \cdot A \cdot \left(\left(K + \frac{B}{1 + \frac{C_{нач} - C}{C_{нач}}} \right) \cdot \beta \right)^\alpha - \left(\left(K + \frac{B}{1 + \frac{C_{нач} - C}{C_{нач}}} \right) \cdot (1 - \beta) \right)^\alpha - \sum_{i=1}^N E(D_i, C_i) \cdot A \cdot \left(K + \frac{B}{1 + \frac{C_{нач} - C}{C_{нач}}} \right) \cdot \beta + OI_2 - OE_2 \xrightarrow{\max} C \quad (2)$$

где z – цена за единицу продукции, A – технологический коэффициент, α – коэффициент эластичности по труду.

В модели приняты следующие ограничения [6, 7] на управляющие параметры субъектов управления:

$$D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \quad (3)$$

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (4)$$

Где D_{\min}, D_{\max} – соответственно, минимальная и максимальная норма выброса углекислого газа; C_{\min}, C_{\max} – соответственно, минимальное и максимальное количество выбрасываемое количество углекислого газа предприятием после прохождения через очистительные предприятия.

Предлагаемый метод исследования модели

Рассматриваемая модель имеет иерархическую структуру и будет исследоваться численным методом имитационного моделирования на основе перебора управляющих стратегий ведущего и ведомого с некоторым фиксированным шагом [8, 9]. Реализация метода выполнена на языке программирования Python. Реализация алгоритма состоит в следующем [10]:

1. Область управления Ведущего разбивается на n частей и фиксируется его управление D_i .
2. Область управления Ведомого разбивается на m частей и фиксируется его управление C_j .
3. Находится максимум целевой функции Ведомого (2) при зафиксированном управлении всех членов модели., при этом запоминается его управление C_j^* .
4. Находится максимум целевой функции Ведущего (1) при его зафиксированном управлении и C_j^* и запомним его управление D_i^*
5. Среди точек (D_i^*, C_j^*) выбирается та, в которой значение целевой функции Ведущего максимально.

Согласно D_{min}, D_{max} взяты как константы, поэтому (3) можно переписать в виде $50 \leq D \leq 150$. Ограничение (4) может быть представлено в следующем виде $10 \leq C \leq 150$. Здесь D и C измеряются в тысячах тонн.

Результаты расчетов

Пример 1.

Зафиксируем $OI1=5000000000$ руб., $OE1=10000000000$ руб., $OI2=500000000$ руб., $OE2=100000000$ руб., $A=0.5$ у.е., $\beta=0.8$ у.е., $\alpha=1$ у.е., $N=2$ шт., $r=2$ у.е., $K=20000$ тыс. руб., $B=50000$ тыс. руб., $C_{нач}=150$ тыс. тонн, $d=3000000$ тыс. руб., $\gamma=0.8$ у.е., $p1=50$ руб., $p2=100$ руб., $v=2$ тонны, $z=30000$ руб.

$D=50, C=10, J_{sup} = 3992354842$ руб., $J_{ag} = 571982878$ руб.

Пример 2.

Зафиксируем $OI1=5000000000$ руб., $OE1=1000000000$ руб., $OI2=50000000$ руб., $OE2=10000000$ руб., $A=0.5$ у.е., $\beta=0.8$ у.е., $\alpha=1$ у.е., $N=2$ шт., $r=2$ у.е., $K=20000$ тыс. руб., $B=50000$ тыс. руб., $C_{нач}=150$ тыс. тонн, $d=3000000$ тыс. руб., $\gamma=0.8$ у.е., $p1=50$ руб., $p2=100$ руб., $v=2$ тонны, $z=66000$ руб.

$D=100, C=150, J_{sup} = 5662588988$ руб., $J_{ag} = 1328000000$ руб.

Таким образом, доход предприятия тем больше, чем больше цена продажи единицы продукции, что напрямую влияет на его капитализацию и сказывается на количестве выбрасываемого углекислого газа. Оптимальная же стратегия такова, что при низкой капитализации предприятия Росприроднадзору необходимо не превышать норму выбросов углекислого газа, а при высокой капитализации минимизировать норму выбросов, чтобы штрафы для предприятия были существенные, что в свою очередь стимулировало бы его вкладываться в очистительные сооружения.

Заключение

В рамках данного исследования была разработана и проанализирована математическая модель регулирования выбросов углекислого газа в атмосферу. Было проведено имитационное моделирование на основе метода простого перебора. Создана программная реализация алгоритма для построения равновесия Штакельберга и нахождения оптимального решения.

Литература

1. Tyler F. UN: Cities contribute 70 percent of global greenhouse-gas emissions, 2011. URL: zdnet.com/article/un-cities-contribute-70-percent-of-global-greenhouse-gas-emissions/
2. Угольницкий Г.А. Методология и прикладные задачи управления устойчивым развитием активных систем // Проблемы управления. 2019. №2. С. 19-29.



3. Редун В.С., Усов А.Б. Модель оптимального управления деятельностью национального парка // Инженерный вестник Дона, 2021, №5. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_16__5_redun_usov.pdf_3e60c33c5b.pdf.
4. Wickstrom M.H., Carr R., Lackey D. Exploring Yellowstone National Park with Mathematical Modeling. Mathematics Teaching in the Middle School. 2017. №8. pp. 462-470.
5. Bauduin S., Grente O., Santostasi N.L. etc. An individual-based model to explore the impacts of lesser-known social dynamics on wolf populations. Ecological Modelling, 2020. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380020302799/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380020302799/)
6. Кораблина Э.В., Усов А.Б. Равновесие Штакельберга в модели согласования частных и общественных интересах // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5516/.
7. Горбанева О.И. Игровые модели распределения ресурсов в иерархических системах управления качеством речной воды // Математическая теория игр и её приложения. 2010. Т.2. №1. С. 27-46.
8. Редун М.С., Усов А.Б. Моделирование взаимодействия предприятия розничной торговли и коммерческого банка// Инженерный вестник Дона 2021, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6935
9. Суржиков В.И., Шевченко В.К. Подход к развитию экологического туризма на особо охраняемых территориях на основе системного анализа // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. Т.11. №3. С. 50-62.
10. Кувшинов Д.И., Осипов С.И. Численное построение решений Штакельберга в линейной позиционной дифференциальной игре на

основе метода многогранников // Автоматика и телемеханика. 2018. № 3. С. 111-126.

References

1. Tyler F. UN: Cities contribute 70 percent of global greenhouse-gas emissions, 2011. URL: zdnet.com/article/un-cities-contribute-70-percent-of-global-greenhouse-gas-emissions/
2. Ugol'nitskiy G.A. Problemy upravleniya. 2019. №2. pp. 19-29.
3. Redun V.S., Usov A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №5. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_16__5_redun_usov.pdf_3e60c33c5b.pdf.
4. Wickstrom M.H., Carr R., Lackey D. Exploring Yellowstone National Park with Mathematical Modeling. Mathematics Teaching in the Middle School. 2017. №8. pp. 462-470.
5. Bauduin S., Grente O., Santostasi N.L. etc. An individual-based model to explore the impacts of lesser-known social dynamics on wolf populations. Ecological Modelling, 2020. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380020302799/
6. Korablina E.V., Usov A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5516/.
7. Gorbaneva O.I. Matematicheskaya teoriya igr i ee prilozheniya. 2010. Vol.2. №1. pp. 27-46.
8. Redun M.S., Usov A.B. Inzhenernyj vestnik Dona 2021, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6935
9. Surzhikov V.I., Shevchenko V.K. Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa. 2019. Vol.11. №3. pp. 50-62.
10. Kuvshinov D.I., Osipov S.I. Avtomatika i telemekhanika. 2018. № 3. pp. 111-126.