

Оппортунистическое поведение субъектов в трехуровневых системах управления и методы борьбы с ним

М.С. Кравцов, А.Б. Усов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье рассматривается задача борьбы с оппортунистическим поведением супервайзера и агентов в системе контроля качества речных вод. Строится трехуровневая иерархическая модель, включающая принципала, супервайзера и агента. Каждый из субъектов стремится к максимизации своей целевой функции. В качестве метода управления на обоих уровнях используется метод побуждения. Исследуется поведение системы в случае информационных регламентов игры Штакельберга. Приведены обоснования вывода функций, использованных в модели. Продемонстрированы результаты имитации модели при различных начальных условиях. Дан анализ полученных результатов.

Ключевые слова: равновесие Штакельберга, трехуровневая система, побуждение, имитация, оппортунистическое поведение, качество речной воды, иерархия.

Введение

В настоящее время активный рост промышленных предприятий заставляет различные государства обратить внимание на проблему экологии.

Большинство предприятий в результате своей деятельности сбрасывают загрязняющие вещества в водные объекты. С целью регулирования уровня выбросов загрязняющих веществ в реки на государственном уровне создаются контролирующие органы (Супервайзер), которые следят за деятельностью предприятий (Агент) и выписывают штрафы при ненадлежащем очищении предприятиями отходов производства.

Действия контролирующих органов приводят к тому, что предприятия, чтобы не нести убытки, оснащают себя технологиями, позволяющими очищать большее количество загрязняющих веществ из сточных вод, или уменьшают объем выброса сточных вод в реки. При этом в некоторых ситуациях Супервайзер и Агент, в целях увеличения своего дохода или снижения убытков, идут на неправомерную сделку.

В качестве примера в данной статье приводится вариант, когда Агент влияет на итоговую сумму штрафа, передав некоторое вознаграждение

Супервайзеру. В связи с этим государство вынуждено вводить еще один контролирующий орган (Принципал), выявляющий оппортунистические действия со стороны Супервайзера и Агента. В случае выявления такой деятельности, Супервайзер подвергается наказанию, которое может привести к серьезным убыткам.

Каждый из участников таких отношений стремится извлечь для себя максимальную выгоду. Моделируемая задача тесно связана с задачами из теории игр, методами оптимизации, а также представляет интерес в плане понимания экономических отношений в природоохранной деятельности [1-3].

Постановка задачи

Рассматривается задача контроля за сбросом загрязняющих веществ (ЗВ) в реку и борьбы с оппортунистическим поведением субъектов нижестоящего уровня [4,5]. Имеются Принципал, Супервайзер и Агент, сбрасывающий загрязнения в реку. Каждый из субъектов задачи имеет по 2 управляющих параметра, изменяя которые, может повлиять на свой итоговый выигрыш.

Принципал ставит перед собой задачу вести борьбу с оппортунистическим поведением Супервайзера и Агента, выделяя ресурс на мониторинг и поиск правонарушений со стороны Супервайзера. Вторым параметром Принципал влияет на выигрыш Супервайзера, управляя долей, которую забирает себе с полученных от Агента штрафов.

Супервайзер влияет на Агента путем выбора размера штрафного коэффициента на сброс ЗВ и также позволяет Агенту за некоторое вознаграждение повлиять на штрафной коэффициент в сторону уменьшения.

Агент выбирает степень очистки сточных вод и размер вознаграждения, которое он готов предоставить за уменьшение штрафного

коэффициента. В модели явно задана вероятность, с которой Принципал может раскрыть подобные нарушения и наказать Супервайзера. Последнее отражено в целевой функции Супервайзера.

Таким образом, имеется трехуровневая иерархическая система управления, в которой каждый субъект верхнего уровня влияет на субъекты нижнего [6,7]. Первым делает ход Принципал, выделяя ресурс на борьбу с оппортунистическими действиями Супервайзера и Агента, а также выбирая долю, которую будет забирать у Супервайзера с полученных от Агента штрафов. Следующий ход делает Супервайзер, назначая штрафной коэффициент за выброс Агентом ЗВ и выбирая степень готовности взять от Агента вознаграждение. Получив эти данные, Агент выбирает свою стратегию, устанавливая степень очистки выбросов и размер вознаграждения, которое он передаст Супервайзеру за уменьшение штрафного коэффициента. Все субъекты модели стремятся максимизировать свою прибыль.

Целевые функции игроков определяются в следующем виде:

$$y_0 = -C_1\gamma^{a_1} + C_2\alpha Penalty(s, w, p) + C_3F(\gamma)\beta\delta \rightarrow \max_{\alpha, \gamma} \quad (1)$$

$$y_1 = C_2(1 - \alpha)Penalty(s, w, p) - C_3F(\gamma)\beta\delta + C_4\beta\delta - C_5(w(1 - p))^{a_2} \rightarrow \max_{s_0, \delta} \quad (2)$$

$$y_2 = Z - \frac{Dpw}{1 - p} - C_2Penalty(s, w, p) - C_4\beta\delta \rightarrow \max_{p, \beta} \quad (3)$$

$$s = s_0 \left(1 - s_1 \delta \frac{\beta}{\beta_{\max}} \right) \quad (4)$$

Ограничения на управления имеют вид:

$$0 < \alpha < 1 \quad (5)$$

$$0 \leq p \leq 0.9 \quad (6)$$

$$0.9 < s_0 < 1.1 \quad (7)$$

$$0 < s_1 < 1 \quad (8)$$

$$11.5 \leq \gamma \leq 13.9 \quad (9)$$

$$0 \leq \beta \leq 1000 \quad (10)$$

$$\delta \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$a_1, a_2, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 \equiv const \quad (12)$$

Здесь:

- Y_0 – целевая функция Принципала;
 - Y_1 – целевая функция Супервайзера;
 - Y_2 – целевая функция Агента;
 - α – доля, взимаемая с доходов Супервайзера со штрафов, управляющий параметр Принципала;
 - γ – ресурс, выделяемый на борьбу с оппортунизмом, управляющий параметр Принципала;
 - s_0 – штрафная ставка за единицу сброшенных Агентом в реку ЗВ, управляющий параметр Супервайзера;
 - δ – решение Супервайзера о получении вознаграждения со стороны Агента, управляющий параметр Супервайзера;
 - β – размер вознаграждения Супервайзера за уменьшение размера штрафной ставки, управляющий параметр Агента;
 - p – степень очистки выбросов, управляющий параметр Агента;
- условия (3), (4) показывают, что не существует технологий, позволяющих производить полную очистку выбросов;

- Z – фиксированный доход Агента, который он получает в результате своей производственной деятельности (в данной задаче взят за константу);
- $C_1\gamma^{a_1}$ – затраты Принципала на борьбу с оппортунистическим поведением Супервайзера;
- $C_3F(\gamma)\beta\delta$ – штраф, взимаемый с Супервайзера за оппортунистические действия;
- $F(\gamma)$ – вероятность обнаружить оппортунистические действия Супервайзера в зависимости от выделенных ресурсов;
- $Penalty(s, w, p)$ – функция штрафа Агента за сброс ЗВ в реку;
- $C_2\alpha Penalty(s, w, p)$ – доля штрафа за выброс ЗВ в реку, переходящая Принципалу;
- $C_2(1-\alpha)Penalty(s, w, p)$ – доля штрафа за выброс ЗВ в реку, переходящая Супервайзеру;
- $C_4\beta\delta$ – вознаграждение Супервайзера за уменьшение штрафной ставки;
- $C_5(w(1-p))^{a_2}$ – затраты Супервайзера на рекреационные мероприятия;
- $\frac{Dpw}{1-p}$ – затраты Агента на очистку сточных вод.

Функция вероятности обнаружения взятки строится на основе динамики преступлений по ст. 290 УК РФ (Получение взятки) за период с 2014 по 2019 год и данных о выделенном на антикоррупционные мероприятия бюджете, который полагается пропорциональным выделенному Федеральному бюджету и масштабируется в соответствии с заданной математической моделью. На основе этих данных строится

интерполяционный многочлен Лагранжа, который задает функцию вероятности на отрезке [11.5,13.9].

Сумма штрафа за сброс загрязняющих веществ рассчитывается на основе следующих параметров: объем сброшенных за текущий период ЗВ в реку, технологическая оснащенность Агента. В связи с этим вводятся следующие коэффициенты (п. 5 ст. 16.3 Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 27.12.2019)): 0 – Агент обладает наивысшей технологической оснащенностью и сбрасывает ЗВ, не превышая нормативы допустимых выбросов; 1 – Агент не обладает должным уровнем технологической оснащённости, но сбрасывает ЗВ, не превышая нормативы допустимых выбросов; 25 – Агент превышает нормативы допустимых выбросов. При этом Супервайзер имеет возможность увеличивать ставку сброса ЗВ, вводя дополнительный коэффициент на данный расчетный период. Таким образом, функция платы за сброс ЗВ определяется следующим образом:

$$Penalty(s, w, p) = \begin{cases} 0, & p \geq p_{техн}, w(1-p) \leq w_{допуст} \\ sw(1-p)k, & p < p_{техн}, w(1-p) \leq w_{допуст} \\ 25sw(1-p)k, & w(1-p) > w_{допуст} \end{cases}$$

Здесь k – ставка за сброс 1 тонны загрязняющих веществ (определяется Постановлением Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913, для меди на 2019 год определена ставка 735534.3). Нормативы по допустимому сбросу ЗВ для каждого предприятия вычисляются отдельно.

Решение задачи сводится к нахождению равновесия Штакельберга с помощью имитационного моделирования на ЭВМ [8-10]. Ниже представлены некоторые результаты, полученные с помощью Информационно-аналитической системы управления качеством водных ресурсов для задачи (1) — (12):

Пример 1.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.001, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 125000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 11.5, \alpha = 0.1, s_0 = 0.98, \delta = 0, p = 0.8, \beta = 0.0, \\ y_0 = 4525.23, y_1 = 4176.10, y_2 = 19500.0$$

При малом объеме выбросов загрязняющих веществ в реку и при приемлемой стоимости очистки сточных вод Агент предпочитает очищать отходы на том уровне, который позволяет не платить штрафы. Принципал предпочитает забирать себе наименьшую долю от штрафов. Супервайзер устанавливает штрафную ставку на невысоком уровне.

Пример 2.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.004, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 125000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 11.5, \alpha = 0.1, s_0 = 0.9, \delta = 0, p = 0.9, \beta = 0.0, \\ y_0 = 4525.23, y_1 = 3662.58, y_2 = 15500.0$$

При небольшом росте объема выбросов Агент предпочитает увеличить степень очистки до того уровня, который позволяет ему не платить штрафы. Супервайзер при этом предпочитает понизить штрафную ставку. Такие изменения не влияют на выигрыш Принципала, поэтому значения его управляющих параметров не изменяются. Выигрыши Агента и Супервайзера в то же время снизились.

Пример 3.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.008, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 125000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 12.3, \alpha = 0.7, s_0 = 1.08, \delta = 0, p = 0.9, \beta = 0.0, \\ y_0 = 16742.40, y_1 = 8068.62, y_2 = -6476.29$$

При данном уровне объема сбросов загрязняющих веществ Принципал увеличивает расходы на борьбу с оппортунистическим поведением Супервайзера и Агента и вместе с тем заметно увеличивает долю, которую забирает у Супервайзера со штрафов. Супервайзер предпочитает отказаться от вознаграждения в пользу увеличения штрафного коэффициента. Агент использует максимум ресурсов для очистки сточных вод, но при этом уровень выбросов не позволяет ему не платить штрафы, что отражается на его итоговом выигрыше, который значительно уменьшается. Выигрыши Принципала и Супервайзера заметно возрастают, в отличие от сценариев 1,2.

Пример 4.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.001, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 250000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 11.5, \alpha = 0.9, s_0 = 1.08, \delta = 0, p = 0.5, \beta = 0.0, \\ y_0 = 4918.45, y_1 = 3478.99, y_2 = 19313.09$$

Уровень сброса в данном случае аналогичен сценарию 1, при этом выросла стоимость очистки сточных вод. Агент предпочитает уменьшить степень очистки в пользу оплаты штрафов, в отличие от сценария 1. Принципал в данном случае позволяет себе забирать у Супервайзера наибольшую долю со штрафов. Так как объем выбросов незначительный, то Супервайзер отказывается от оппортунизма в пользу увеличения штрафного коэффициента. Выигрыши всех игроков незначительно изменились по сравнению со сценарием 1.

Пример 5.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.008, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 250000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 13.6, \alpha = 0.9, s_0 = 1.08, \delta = 1, p = 0.8, \beta = 1000.0, \\ y_0 = 18420.76, y_1 = 5511.23, y_2 = -5981.03$$

При данном сценарии наблюдается оппортунистическое поведение у Супервайзера и Агента. Принципал, замечая это, прикладывает максимальные усилия для борьбы с неправомерными действиями. Супервайзер, видя плохое положение Агента и действуя в своих целях, повышает штрафной коэффициент до максимального уровня, который затем уменьшает Агент путем вознаграждения. При этом Агент старается максимально очистить сточные воды. Действия Принципала оказываются оправданными, и он получает значительный выигрыш. Супервайзер за счет своих действий также получает приемлемый выигрыш. Наибольшие проблемы закономерно возникают у Агента, который теряет значительные средства.

Пример 6.

Рассматривается следующий набор входных данных:

$$w = 0.02, a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, Z = 20000.0, D = 250000, s_1 = 0.6, \\ C_1 = 140, C_2 = 1.1, C_3 = 2.3, C_4 = 4, C_5 = 320000$$

В результате численного моделирования игроки приходят к следующим равновесиям и выигрышам:

$$\gamma = 11.5, \alpha = 0.9, s_0 = 1.08, \delta = 0, p = 0.9, \beta = 0.0, \\ y_0 = 43846.90, y_1 = 5239.82, y_2 = -68690.73$$

Данный сценарий интересен тем, что при росте объема выбросов, по сравнению со сценарием 5, Супервайзер и Агент отказываются от

оппортунизма. Принципал при этом тратит минимум ресурсов на борьбу с неправомерными действиями, но забирает значительную долю с суммы штрафов у Супервайзера. Агент старается максимально очищать сточные воды. Супервайзер назначает максимальную штрафную ставку. В данном случае Принципал получает наибольший выигрыш из всех рассмотренных ранее сценариев. Агент же уходит в большие убытки.

Вывод

Рассмотрено 6 различных сценариев при разных входных данных. При высокой стоимости технологии очистки, инициатором неправомерных действий выступает Агент. Из сценариев 5, 6 видно, что рост объема сбрасываемых загрязняющих веществ в реку не всегда гарантирует то, что Супервайзер будет готов пойти на сделку с Агентом. Это говорит об эффективности принимаемых Принципалом мер по борьбе с оппортунистическим поведением Супервайзера и Агента.

Заключение

Предлагаемая модель представляет собой трехуровневую иерархическую игру. Нахождение равновесия сводится сначала к нахождению реакции Агента на выбранные управления Супервайзера, затем к нахождению реакции Супервайзера на выбранные управления Принципала и к нахождению оптимальной для Принципала стратегии. Ввиду сложности аналитического решения, предлагается решить задачу путем имитационного моделирования.

В дальнейшем планируется рассмотреть динамические модели при наличии возможности коррупционного поведения субъектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-01-00053.

Литература

1. Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Сурков Ф.А. Модели управления эколого-экономическими системами. М.: Наука, 1984. 120 с.
2. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. М.: Радио и связь, 1982. 144 с.
3. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем. М.: Дело, 2003. 336 с.
4. Розин М.Д., Суций С.Я., Угольницкий Г.А. и др. Дескриптивный подход к моделированию коррупции как фактора социальной конфликтности // Инженерный вестник Дона, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/561
5. Мальсагов М.Х., Угольницкий Г.А. Дифференциально-игровые модели коррупции при распределении ресурсов // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4984
6. Мулен Э. Теория игр с примерами из математической экономики. М.: Мир, 1985. 200 с.
7. Назиров А.Э., Усов А.Б. Моделирование трехуровневого канала распределения продукции // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2393
8. Intriligator M. Mathematical optimization and economic theory. New York: Prentice Hall, 1971. 529 p.
9. Fan L.T., Wang C.S. The discrete maximum principle. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1964. 256 p.
10. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 232 с.

References

1. Gorstko A.B., Dombrovskiy YU.A., Surkov F.A. Modeli upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami [Ecological-economic systems management models]. M.: Nauka, 1984 120 p.
2. Gorelik V.A., Kononenko A.F. Teoretiko-igrovye modeli prinjatija reshenij v jekologo-jekonomicheskikh sistemah [Game-theoretic models of decision making in environmental-economic systems]. M.: Radio i svjaz', 1982. 144 p.
3. Kobelev N.B. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh ekonomicheskikh sistem [The basics of simulation modeling of complex economic systems]. M.: Delo, 2003. 336 p.
4. Rozin M.D., Sushhij S.Ja., Ugol'nickij G.A. i dr. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/561
5. Mal'sagov M.H., Ugol'nickij G.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4984
6. Mulen Je. Teorija igr s primerami iz matematicheskoj jekonomiki [Game theory with examples from mathematical economics]. M.: Mir, 1985. 200 p.
7. Nazirov A.Je., Usov A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2393
8. Intriligator M. Mathematical optimization and economic theory. New York: Prentice Hall, 1971. 529 p.
9. Fan L.T., Wang C.S. The discrete maximum principle. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1964. 256 p.
10. Maksimej I.V. Imitacionnoe modelirovanie na JeVM [Computer Simulation]. M.: Radio i svjaz', 1988. 232 p.