

## Категория деятельности

Category of activity / Kategorie der Tätigkeit

УДК 519.876.2



В.О. Корепанов



В.В. Шумов

**Корепанов В.О.\*,**  
**Шумов В.В.\*\***

## Распределение пограничных ресурсов с использованием равновесия Штакельберга

\*Корепанов Всеволод Олегович, кандидат технических наук, старший математик, Институт проблем управления РАН  
E-mail: moskvo@yandex.ru

\*Шумов Владислав Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, действительный член Отделения погранологии Международной академии информатизации  
E-mail: vshum59@yandex.ru

В статье рассматривается теоретико-игровая модель, позволяющая вычислять критерий эффективности охраны границы — математическое ожидание предотвращенного ущерба. На основе равновесия Штакельберга находится оптимальное распределение ресурсов, гарантирующее максимум целевой функции центра в его иерархической игре с нарушителями границы.

**Ключевые слова:** охрана границы, пограничный менеджмент, субъекты воздействия, оптимальная стратегия пограничной системы, теоретико-игровая модель.

### Введение

Пограничная деятельность направлена на повышение могущества государства [Шумов 2012] (его способности суверенно принимать и реализовывать определенные решения) и общественного благосостояния (благосостояние — «понятие социальное и политическое, так как под Б. понимается наличность таких условий, при которых человек с успехом может стремиться к достижению великого для себя блага — всестороннего развития» [Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона 1890—1907]).

Основными угрозами государству и обществу в пограничном пространстве являются угрозы терроризма (попытки принудить государственную власть принимать определенные, выгодные внешним силам решения и действия), контрабанды (подрыв экономического суверенитета, нанесение ущерба здоровью и нравственности обществу), нелегальной миграции (нанесение экономического ущерба, рост межнациональной напряженности и конфликтов) и т.д.

По оценкам российских и иностранных экспертов [Страны Евросоюза встревожены ростом нелегальной миграции 2002] маршруты нелегальной миграции, как правило, совпадают с маршрутами контрабанды наркотиков, а сами каналы нелегальной миграции нередко используются для переправки террористов, оружия, средств террора и диверсий. Это свидетельствует о координации действий преступных группировок, занимающихся различными видами криминальной деятельности, укреплении связи международных террористических организаций с трансграничной организованной преступностью.

С. Хадалл, формулируя вызовы, с которыми сталкиваются пограничные службы, отмечает, что нарушители обходят хорошо оборудованные и охраняемые участки границы. Как показывает практика, нарушители выбирают место проникновения на значительном удалении от района (региона) проживания для снижения рисков быть задержанными [Haddal 2010].

Г.М. Лапшин на основании изучения уголовных дел о незаконном пересечении государственной границы отмечает, что «...незаконное пересечение Государственной границы РФ невозможно без предварительной подготовки, изучения обстановки, создания ряда условий, способствующих «благоприятному» для преступников исходу преступления» [Лапшин 2002].

В настоящей работе будем рассматривать только нижние уровни обеспечения пограничной безопасности, называемые в погранологии и теории охраны границы пограничным менеджментом (Border Management) и охраной границы (Border Control), исключив из рассмотрения пограничные конфликты, проблемы обеспечения защиты (Border Safety) и безопасности границы [Голунов 2007; Тынянова 2010; Duggan 2008; Haddal 2010; Papademetriou, Collett 2011] (Border Security).

КОРЕПАНОВ В.О., ШУМОВ В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОВЕСИЯ ШТАКЕЛЬБЕРГА

Цель работы — найти оптимальное (рациональное) распределение пограничных ресурсов на уровне приграничного региона<sup>1</sup>, максимизирующее значение критерия охраны границы.

<sup>1</sup> Приграничный регион — крупная индивидуальная территориальная единица, граничащая с одним или несколькими однородными государствами (или выходящая к открытому морю).

### 1. Классификация и характеристика субъектов воздействия и пограничной системы

Противником в пограничном пространстве являются (потенциальные) правонарушители, преследующие антагонистические или не совпадающие с интересами правоохранительных структур и общества целями — субъекты воздействия (далее СВ) со стороны пограничной службы.

СВ классифицируются по следующим основаниям [Шумов 2012]:

1. Организационная роль: выгодоприобретатели, организаторы трансграничных преступных группировок (далее ТПГ), участники ТПГ, отдельные нарушители границы (агенты), пособники, коррупционеры и т.д.
2. Цели действий: терроризм, контрабанда, нелегальная миграция и т.д.
3. Степень рациональности: полная или ограниченная [Новиков 2012, с. 21–22].
4. Ожидаемый ущерб общественному благосостоянию.
5. Степень восприимчивости к информационным воздействиям и т.д.

Принятое в научных исследованиях [Клейнер 2003, с. 167–182] разделение СВ на два класса (экономические мотивы и иные мотивы) весьма условно. А.Ш. Викторов, ссылаясь на исследования зарубежных ученых, выделяет следующие домены (архетипы, универсальные мотивационные типы): самостоятельность, стимуляция, гедонизм, достижения, власть, безопасность, конформизм, традиции, щедрость, универсализм [Основы социологии терроризма... 2008, с. 114]. К тому же применительно к приграничному региону различиями в экономических факторах (уровень дохода в сопредельном государстве, денежный эквивалент наказания и др.) можно пренебречь, поскольку они постоянны для всех участков региона.

Адекватная оценка [Васин, Картунова, Уразов 2010, с. 69] ущерба государству и обществу от действий СВ должна включать все компоненты благосостояния (возможная гибель людей в результате терактов, гибель и потеря здоровья в результате употребления наркотиков, потери от межнациональных конфликтов, заражения от носителей эпидемических заболеваний, ущерб экономике и инфраструктуре и т.д.).

Разделим СВ на два класса: организаторов ТПГ (далее ОТПГ) и агентов, действующих самостоятельно или по приказу ОТПГ. Перечисленные классификации дают нам основания для разделения агентов на непересекающиеся группы ( $i = 1, \dots, n$ ) и для предположения, что агенты внутри каждой группы однородны. Схема возможных действий агентов представлена на рис. 1 [Шумов 2012, с. 136].

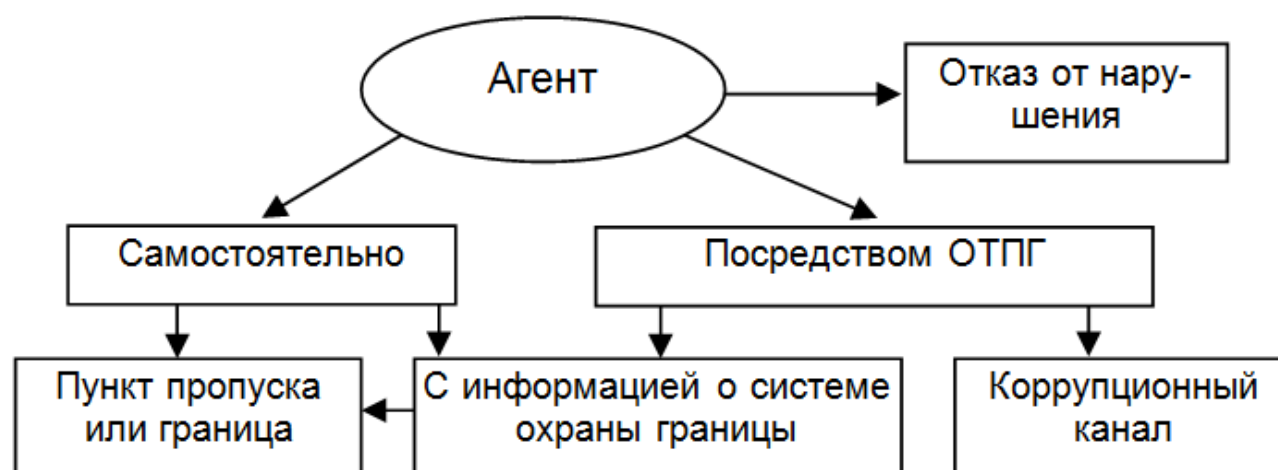


Рис. 1. Выбор агента

Декомпозируем региональную пограничную систему на подсистемы пограничных подразделений, охраняющих назначенные участки границы и несущие службу в пунктах пропуска —  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  — множество подсистем. Результативность действий  $j$ -го подразделения по  $i$ -ой группе агентов характеризуется пограничной производственной функцией (вероятностью задержания) вида [Шумов 2012, с. 45]:

$$p_j^i = 1 - \exp(-k_j^i y_j), \quad (1)$$

где:  $y_j \geq 0$  — совокупная стоимость владения средствами охраны границы в  $j$ -м подразделении и расходы на содержание персонала,

$k_j^i > 0$  — параметр эффективности, характеризующий тактику агента группы  $i$ , технологию<sup>2</sup> пограничной службы и внешнюю среду на участке  $j$ -го подразделения.

<sup>2</sup> Технология — совокупность методов, операций, приемов, этапов и т. д., последовательное осуществление которых обеспечивает решение поставленной задачи

КОРЕПАНОВ В.О., ШУМОВ В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОВЕСИЯ ШТАКЕЛЬБЕРГА

Без ограничения общности предположим, что коррупционный канал характеризуется функцией вида (1). Коррупционный канал может быть представлен или двумя элементами (коррупционеры в пунктах пропуска и на границе) или элементами по количеству пограничных подразделений.

Также полагаем, что неопределенности, связанные со временем года, суток, состояниями погоды и физико-географическими характеристиками конкретного участка устраняются на уровне подразделения. Это предположение соответствует практике охраны границы — решения на уровне региона принимаются на квартал (полгода) или год.

С целью сокращения расходов на сбор и поддержку в актуальном состоянии данных по всем участкам границы для вычисления параметра  $k_j^i$ , рекомендуется разделить участки границы (и пункты пропуска) на типовые [Шумов 1996]. Конкретный типовой участок характеризуется типом местности (пустынная, лесная и т.д.), прохождением границы (на суше или воде) и др.

Наличие обоснованных и адекватных математических моделей пограничной безопасности и соответствующего программного обеспечения позволит пограничной службе добиться повышения качества принимаемых решений по сравнению с решениями руководителей ТПГ. В тоже время математические модели должны учитывать все существенные факторы, которыми оперируют пограничные руководители, и оперировать понятным языком, отражающим тактические и специальные категории. В противном случае они не будут вызывать доверия и окажутся невостребованными. Поэтому перейдем к предлагаемой игровой модели взаимодействия пограничной системы и субъектов воздействия. Для этого в следующем разделе введем множества действий игроков и их целевые функции.

## 2. Модель пограничной системы и субъектов воздействия

Пограничная система имеет ограниченный бесконечно делимый ресурс, денежный эквивалент которого равен  $R$  (денежные средства, оборудование, расходные материалы и т.п.). Множество  $Y$  допустимых действий — распределение ресурса по множеству пограничных участков  $N$  (подразделений, каналов):

$$Y = \left\{ y \in \mathbb{R}^n : y_j \geq 0, \sum_{j=1}^n y_j \leq R \right\}. \quad (2)$$

На участке региона всего имеется  $A$  агентов и известно их количественное распределение по  $m$  группам:

$$\sum_{i=1}^m A^i = A, \quad M = \{1, \dots, m\}. \quad (3)$$

Отметим, что обычно стабильное количество агентов может резко измениться, например, в результате чрезвычайных ситуаций или социальных бедствий.

В случае успешного нарушения границы агент  $i$ -й группы наносит ущерб общественному благосостоянию в размере  $u_i$ .

Пусть  $x_j^i \in [0, A^i]$  — количество агентов группы  $i$ , выбравших участок  $j$  или отказавшихся от попытки нарушения границы ( $j = 0$ ).

Исключим из рассмотрения нарушителей режима границы (лиц, ведущих сельскохозяйственные и иные работы вблизи границы с нарушением установленного режима). Тогда множество допустимых действий агентов есть:

$$X = \left\{ x \in \mathbb{R}^{m \times n} : x_j^i \geq 0, j \in N \cup \{0\}, \sum_{j \in N \cup \{0\}} x_j^i = A^i, i \in M \right\}. \quad (4)$$

Целевая функция пограничной системы — предотвращенный ущерб за вычетом расходов на охрану границы [Шумов 2012]:

$$F(y, x) = \sum_{i=1}^m u_i \left( x_0^i + \sum_{j=1}^n p_j^i(y_j) x_j^i \right) - R \rightarrow \max$$

(ущерб считается предотвращенным, если агент отказался от попытки нарушения границы или был задержан). Или, упрощая:

$$F(y, x) = \sum_{i=1}^m u_i \sum_{j=0}^n p_j^i(y_j) x_j^i \rightarrow \max, \text{ где } p_0^i(y_0) \equiv 1. \quad (5)$$

Предположим, что каждой группой агентов руководит свой ОТПГ. Тогда целевая функция ОТПГ  $i$ -й группы — количество агентов группы  $i$ , успешно нарушивших границу [Шумов 2012]:

$$f_i(y, x) = \left( \sum_{j=1}^n (1 - p_j^i(y_j)) x_j^i - x_0^i \right) \rightarrow \max, \quad i \in M.$$



КОРЕПАНОВ В.О., ШУМОВ В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОВЕСИЯ ШТАКЕЛЬБЕРГА

Очевидно, что для ОТПГ оптимально  $x_0^i = 0$ , тогда задача ОТПГ:

$$f_i(y, x) = \left( \sum_{j=1}^n (1 - p_j^i(y_j)) x_j^i \right) \rightarrow \max, i \in M, \text{ или}$$

$$\bar{f}_i(y, x) = \sum_{j=1}^n p_j^i(y_j) x_j^i \rightarrow \min, i \in M. \quad (6)$$

Будем считать, что игра иерархическая: первым ход делает ПС, а затем все ОТПГ. Тогда мы имеем теоретико-игровую постановку игры  $m + 1$  лиц.

Рассмотрение предложенной игры в нормальной форме, когда действия игроки принимают одновременно, тоже имеет место и содержательно означает, что циклы деятельности сторон сопоставимы по времени. Например, если действие пограничной стороны заключается в оборудовании участка границы инженерными препятствиями, в развертывании сети сенсоров, то по времени данный цикл продлится несколько месяцев или лет, тогда логичнее рассматривать иерархическую игру. Если же речь идет о планировании времени и маршрута вылета беспилотного летательного аппарата или подвижного наряда (патруля), то есть все основания считать выбор альтернатив игроками одновременным.

Дополнительно к одновременности в играх в нормальной форме накладывается требование, что действия игроки выбирают каждый независимо от остальных и не зная хода оппонентов [Губко, Новиков 2005]. Требование незнания хода оппонента следует дополнить требованием невозможности своевременно отреагировать на него. Например, если сведения о нарушении границы поступили с задержкой и отсутствует возможность своевременно пресечь эти действия, то в данном случае знание хода оппонента оказалось бесполезным.

В ситуации, когда Организатор ТПГ создаёт нелегальный канал, ему требуется значительное время и ресурсы, поэтому можно считать, что такой ОТПГ и региональная пограничная система принимают решения одновременно. Во всех остальных случаях положим, что пограничная система делает ход первой (иерархическая игра).

Рассмотрим решение простейшей игры ПС против одной ОТПГ без создания нелегального канала.

### 3. Решение простейшей игры ПС и ОТПГ

Поскольку группа одна, то верхний индекс, обозначающий группу, везде будем опускать.

Заметим, что в данной игре равновесие Штакельберга совпадает [Губко, Новиков 2005] с равновесием в гарантирующих стратегиях или просто с равновесием в игре  $\Gamma_1$ . Равновесие Штакельберга для ПС и ОТПГ —  $(y^*, x^*)$  — формально определяется следующим образом:

$$y^* \in \text{Arg} \max_{y \in Y, x \in R_x(y)} F(y, x) = \text{Arg} \max_{y \in Y, x \in R_x(y)} \sum_{j=0}^n p_j(y_j) x_j, \quad (7)$$

$$x^* \in R_x(y^*) = \text{Arg} \min_{x \in X} \bar{f}(y, x) = \text{Arg} \min_{x \in X} \sum_{j=1}^n p_j(y_j^*) x_j. \quad (8)$$

Легко догадаться, что:

$$R_x(y) = \{ x \in X \mid x_j > 0 \Leftrightarrow j \in \text{Arg} \min_j p_j(y_j), \sum_{j=1}^n x_j = A \}, \quad (9)$$

или иначе, второй игрок выбирает участок с наименьшей вероятностью задержания и отправляет туда всех нарушителей (если таких участков несколько, то распределяет нарушителей по ним произвольным образом).

Тогда очевидно, что наилучшим ответом ПС на такое поведение, будет распределять ресурс так, чтобы вероятности на всех участках были равны:

$$k_j y_j^* = k_s y_s^*, \sum_{j=1}^n y_j^* = R \Rightarrow y_j^* = \frac{R}{k_j \sum_{s=1}^n 1/k_s}. \quad (10)$$

Тогда  $f(y^*, x) = p_1(y_1^*) \sum_{j=1}^n x_j$  и, следовательно, от выбора  $x$  эта сумма уже не зависит. Получаем, что множество равновесий Штакельберга для данной игры это:  $S = \{ (y^*, x) \mid x \in X \}$ .

Выигрыши игроков в равновесии Штакельберга:

$$F(y^*, x^*) = A \cdot u \cdot \left( 1 - \exp\left(-R / \sum_{s \in N} \frac{1}{k_s}\right) \right),$$

$$f(y^*, x^*) = A \cdot \exp\left(-R / \sum_{s \in N} \frac{1}{k_s}\right).$$

КОРЕПАНОВ В.О., ШУМОВ В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОВЕСИЯ ШТАКЕЛЬБЕРГА

Таким образом, оптимальная стратегия пограничной системы (в условиях, когда она делает ход первой) заключается в распределении ограниченного ресурса между подразделениями таким образом, чтобы обеспечить одинаковую вероятность задержания нарушителей.

**Заключение**

Мы получили теоретико-игровое подтверждение справедливости важнейшего принципа охраны границы — непрерывности охраны по направлениям, времени и задачам. В условиях, когда организаторы ТПГ не создают нелегальные каналы через границу, а только предоставляют информацию агентам о системе охраны границы в приграничном регионе (то есть сообщают место и время, где вероятность их задержания минимальна), оптимальная стратегия пограничной системы заключается в обеспечении одинаковой вероятности задержания на всех участках. При этом ресурс распределяется неравномерно, поскольку имеются различия в физико-географических и тактических особенностях участков границы приграничного региона. При такой стратегии распределения ресурса у агентов отпадает потребность обращаться к организаторам трансграничной преступности для получения информации о системе охраны границы, что потенциально служит снижению вызовов и угроз пограничной безопасности.

Представляется актуальными дальнейшие исследования по поиску равновесий Нэша и Штакельберга в усложнённых постановках: несколько ОТПГ, наличие не подвластных ОТПГ агентов, а также рассмотрение практически важных случаев одновременности ходов ПС и нарушителей границы — игр в нормальной форме.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Васин А.А., Картунова П.А., Уразов А.С. Модели организации государственных инспекций и борьбы с коррупцией // Математическое моделирование. Т. 22. № 4. М.: ИММ РАН, 2010. С. 67—89.
2. Голунов С. Безопасность пограничных пространств // Международные процессы. 2007. № 2(14). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intertrends.ru/fourteen/003.htm>. Дата обращения 20 апреля 2013 г.
3. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. Издание 2-е. М.: ИПУ РАН, 2005. 138 с.
4. Клейнер Г.Б. К методологии моделирования принятия решений экономическими агентами // Экономика и математические методы. Т. 39. № 2. М.: ЦЕМИ РАН, 2003. С. 167—182.
5. Лапшин Г.М. Методика расследования незаконного пересечения Государственной Границы Российской Федерации: Автореф. дис. канд. юрид. наук. СПб., 2002. 23 с.
6. Новиков Д.А. Методология управления. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 128 с.
7. Основы социологии терроризма. Коллективная монография. М.: МГУ, 2008. 351 с.
8. Страны Евросоюза встревожены ростом нелегальной миграции // KM.RU. 28.06.2002. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.km.ru/magazin/view.asp?id=E085448DE7384C088A2B0A1A85B16807>
9. Тынянова О.Н. К вопросу о теоретических основах пограничной безопасности // Погранология. Материалы постоянно действующего межведомственного научного семинара. № 2. М.: Пограничная академия ФСБ России, Отделение погранологии Международной Академии информатизации. 2010.
10. Шумов В.В. Модели пограничного сдерживания. М.: ЛЕНАНД, 2012. 200 с.
11. Шумов В.В. Применение математических методов и моделей для обоснования решений на охрану государственной границы: Научно-практическое пособие. В 2 ч. М.: Академия ФПС России, 1996. Ч.1. 184 с.; Ч.2. 197 с.
12. Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона. СПб.: Брокгауз-Ефрон. 1890—1907.
13. Duggan R.A. (2008). A Model for International Border Management Systems. Sandia National Laboratories, SAND2008-6256. 29 p.
14. Haddal C. C. (2010). Analyst in Immigration Policy / People Crossing Borders: An Analysis of U.S. Border Protection Policies // Congressional Research Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.fas.org/spp/crs/homesecc/R41237.pdf](http://www.fas.org/spp/crs/homesecc/R41237.pdf)
15. Papademetriou D.G., Collett E. (2011). New Architecture for Border Management. Washington: Migration Policy Institute. 30 p.

---

КОРЕПАНОВ В.О., ШУМОВ В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОВЕСИЯ ШТАКЕЛЬБЕРГА

## ALLOCATION OF THE BORDER PROTECTION RESOURCE WITH THE USE OF STACKELBERG EQUILIBRIUM

Vsevolod O. Korepanov, PhD (Technical Sciences), Senior Mathematician at RAS Institute of Control Sciences  
E-mail: moskvo@yandex.ru

Vladislav V. Shumov, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Member of International Informatization Academy  
E-mail: vshum59@yandex.ru

The main threats to the state and society in the border area is the threat of terrorism (attempt to force the state government to make certain, favorable external forces decisions and actions), smuggling (erosion of economic sovereignty, damage to health and morals of society), and illegal migration (causing economic damage, the growth of ethnic tensions and conflicts), etc.

The article deals with game-theoretic model that allows calculating the criterion of the effectiveness of border protection — the expectation of damage avoided. On the basis of Stackelberg equilibrium is the optimal allocation of resources, ensuring the maximum objective function center in its hierarchical game with trespassers.

At a time when the organizers of criminal groups do not make illegal channels across the border, but only provide information to agents on the system of border security in the border region (ie, tell the time and place, where the probability of their detention is minimal), the optimal strategy for the border system is to provide the same probability detention in all areas. In this case the resource is distributed unevenly, because there are differences in geographic and tactical features of the border areas of the border region. With this strategy, resource allocation among agents there is no need to contact the organizers of the cross-border crime to obtain information about the system of border protection, which is potentially reducing the challenges and threats to border security.

**Keywords:** border security, border management, subjects of impact, the optimal strategy of the border system, game-theoretic model.