

**Экономико-математическое моделирование механизмов штрафов и страхования для управления водными ресурсами в бассейне Аральского моря**

**Аннотация:** Рассматривается комплексный подход к решению экологической катастрофы Аральского моря через призму экономических механизмов. Анализируются модели штрафов и страхования, а также их синергия в рамках межгосударственного взаимодействия. Предлагается формализованная математическая модель в виде многоагентной системы, позволяющая количественно оценить условия перехода стран региона к кооперативному равновесию и устойчивому водопользованию.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, межгосударственное сотрудничество, экономические механизмы, многоагентное моделирование, страхование рисков, экологические штрафы

**Введение**

Экологическая катастрофа Аральского моря является классическим примером трансграничной проблемы, требующей согласования интересов нескольких государств. Традиционные подходы часто оказываются неэффективными из-за отсутствия понятных экономических стимулов для сотрудничества. В данной работе исследуется возможность применения современных экономических инструментов – моделей штрафов и страхования, – переводящих экологическую проблему в экономическую плоскость. Для перехода от качественных описаний к количественному анализу предлагается формализованная математическая модель, позволяющая найти условия, при которых сотрудничество становится выгодным для всех участников. Из многочисленных работ, посвященных вопросам моделирования механизмов штрафов и страхования, для управления водными ресурсами можно выделить [1] и [2].

## **1. Модели штрафов (Принцип «Загрязнитель платит»)**

Эта модель направлена на то, чтобы изменить поведение основных сторон, чья деятельность вредит экосистеме региона.

Штрафы и платежи призваны сделать экологически вредную деятельность экономически невыгодной. В случае Арала это касается в первую очередь неэффективного водопользования в сельском хозяйстве.

*Вывод.* Модель штрафов – это «палка», которая должна работать в связке с «пряником» (субсидиями, страхованием), чтобы стимулировать переход к устойчивым практикам, а не просто уничтожить сельское хозяйство.

## **2. Модели страхования (Управление климатическими и экологическими рисками)**

Эта модель призвана защитить тех, кто несет убытки из-за экологической катастрофы и тех, кто инвестирует в ее решение.

Страхование перераспределяет финансовые риски, делая последствия катастрофы более управляемыми и придавая уверенности инвесторам и местным жителям.

*Синтез: комплексный подход.*

Наиболее эффективным был бы синергетический подход, где штрафы и страхование работают вместе в рамках более широкой экономической системы.

*Пример схемы. Вводятся* строгие квоты на водопользование и штрафы за их превышение. *Создается* государственный или международный фонд, куда поступают эти штрафные платежи. *Часть средств* из этого фонда направляется на субсидирование страховых взносов для фермеров, которые переходят на водосберегающие технологии; отказываются от выращивания влаголюбивых культур в пользу более засухоустойчивых. *Другая часть* средств направляется на финансирование инфраструктурных проектов (дамб, очистных сооружений, лесопосадок), риски по которым застрахованы у международных страховщиков.

*Вывод.* Применение моделей штрафов и страхования в вопросе восстановления Арала является современным и необходимым подходом. Они переводят экологическую проблему в экономическую плоскость, создавая понятные стимулы и механизмы управления рисками для всех участников.

### **3. Модели Страхования: Межгосударственная солидарность и пулы рисков**

Здесь межгосударственный фактор – это не только проблема, но и потенциальное решение.

**Проблема:** риски распределены неравномерно. Например, последствия солевых бурь сильнее ощущаются в Узбекистане и Казахстане, а решения по забору воды принимаются в том числе и в Таджикистане и Кыргызстане. Страховать риски по отдельности – дорого и неэффективно.

**Межгосударственное параметрическое страхование:** это идеальная, но сложная модель.

**Сценарий:** Страны низовья (Узбекистан, Казахстан) и страны верховья (Таджикистан, Кыргызстан) совместно выступают страхователем.

**Параметр:** Уровень воды в ключевых водохранилищах (Нурекское, Токтогульское) на 1 июня ниже отметки  $X$ . При наступлении страхового случая (засуха) выплата идет единым траншем в фонд МФСА или другой орган, который затем распределяет средства на экстренные меры по всему региону.

Это страхует общий интерес в стабильности региона и мотивирует совместно управлять водными ресурсами, чтобы страховой случай не наступил.

*Вывод.* Фактор межгосударственных отношений не отменяет применение моделей штрафов и страхования, но кардинально меняет их реализацию. Вместо штрафов на первый план выходят межгосударственные компенсационные механизмы и рынки квот под эгидой сильного наднационального органа. Вместо национального страхования необходимо создавать международные страховые пулы и продукты, которые страхуют общие риски и поощряют совместные действия.

*Формализация математической модели* позволит перейти от качественных рассуждений к количественным оценкам, сценариям и оптимизации решений. Такую модель можно построить как многоагентную систему, где каждый агент – это страна-участница, преследующая свои цели, а правила взаимодействия – это и есть предлагаемые механизмы штрафов, страхования и компенсаций.

Базовая модель взаимодействия стран (Игра с ненулевой суммой)

Агенты:  $i = 1, 2, \dots, n$  (страны бассейна Арала).

Цель каждого агента: максимизировать свою функцию полезности  $U_i$ , которая зависит от:

–  $W_i$  – количество воды, использованное для ирригации и экономики.

–  $E_i$  – производство энергии (для стран верховья).

–  $C_i$  – затраты на модернизацию и/или штрафы.

–  $S_i$  – выплаты по страхованию/компенсациям.

Ограничения:

*Водный баланс*

$$\Sigma (W_i) + \Sigma (Losses) \leq Q, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $Q$  – общий сток рек (Сырдарья, Амударья),

$Losses$  – потери на испарение, инфильтрацию и т.д.

*Энергетический баланс (для стран верховья):*  $E_i = f(V_i)$ , где  $V_i$  – объем воды, пропущенной через ГЭС.

Без сотрудничества каждый агент максимизирует свою  $U_i$  в ущерб другим. Это приводит к равновесию по Нэшу, которое является неоптимальным для всех. Задача модели – найти условия, при котором возникает Кооперативное равновесие (оптимум по Парето), где всем участникам выгоднее сотрудничать.

*Математическая модель с механизмами штрафов и компенсаций*

Введем механизмы, меняющие функцию полезности агентов.

а) Функция полезности с штрафами / платежами:  
 $U_i = [\text{Выгода от воды } W_i \text{ и энергии } E_i] - [\text{Затраты } C_i] - [\text{Штраф } P_i] + [\text{Компенсация } K_i].$

Штраф  $P_i$ . Может быть функцией от превышения квоты

$$P_i = k * (W_i - W_{i\_квота})^2, \quad (2)$$

где  $k$  – ставка штрафа.

Квадратичная функция означает, что цена за каждую дополнительную единицу воды резко возрастает.

Компенсация  $K_i$ : Страна  $i$  может получать компенсацию от других стран или общего фонда за предоставление экосистемных

услуг (своевременный сброс воды, содержание водоохраных зон). Например,  $K_i = m * (V_{\text{фактич.о.в.}i} - V_{\text{обязат.о.в.}i})$ , где  $m$  – ставка компенсации.

б) Бюджетно-нейтральный фонд. Чтобы система не увеличивала общую нагрузку, можно сделать фонд компенсаций самодостаточным:  $\Sigma (P_i) = \Sigma (K_i) + T$ , где  $T$  – операционные расходы фонда. Это означает, что штрафы «нарушителей» напрямую финансируют компенсации «лидерам».

### 3. Математическая модель со страхованием

Введем в модель риск (например, засуха) и инструмент хеджирования этого риска – страхование.

*Переменная риска  $R$ .* Пусть  $R$  – это случайная величина, моделирующая, например, объем стока рек.  $R$  может принимать значения от  $R_{\text{min}}$  (сильная засуха) до  $R_{\text{max}}$  (полноводный год).

*Функция полезности со страхованием.* Теперь полезность страны зависит от реализации риска:

$$U_i(R) = [\text{Выгода...}] - [\text{Затраты...}] - [\text{Страховой взнос } A_i] + [\text{Страховая выплата } I_i(R)].$$

Страховой взнос  $A_i$ : Это фиксированные затраты. Могут рассчитываться на основе исторических данных о риске:

$$A_i = f(\text{Вероятн.}(R < R_{\text{критич.порог}}), W_i\text{-квота}).$$

Страховая выплата  $I_i(R)$ : Для параметрического страхования выплата срабатывает автоматически при достижении порога.

$$I_i(R) = \{ \text{Компенсация}_i, \text{ if } R < R_{\text{критич.порог}}; 0, \text{ в ост.сл.} \}.$$

*Ключевая задача модели:* найти такие параметры ( $A_i$ ,  $\text{Компенсация}_i$ ,  $R_{\text{критич.порог}}$ ), чтобы:

1) страхование было выгодным для страны:  $E[U_i \text{ с страхованием}] > E[U_i \text{ без страхования}]$  (математическое ожидание полезности с учетом риска выше).

2) страховая программа была бездефицитной:  $\Sigma(A_i) \geq E[\Sigma(I_i(R))]$ .

### 4. Объединенная модель: Синергия штрафов и страхования

Самый интересный случай – объединить обе модели.

*Общая функция полезности страны:*

$$U_i(R) = [\text{Выгода}] - [\text{Затраты}] - [\text{Штраф } P_i] + [\text{Компенсация } K_i] - [\text{Взнос } A_i] + [\text{Выплата } I_i(R)]$$

*Взаимосвязь механизмов:* Средства от штрафов ( $P_i$ ) могут частично направляться на субсидирование страховых взносов ( $A_{i\_sub}$ ) для стран, соблюдающих квоты ( $A_{i\_sub} = s * A_i$ , где  $s$  (коэффициент субсидии)  $< 1$ ). Это меняет функцию полезности и стимулы.

Страховая выплата  $I_i(R)$  может зависеть от того, соблюдала ли страна квоты. Например, выплата может быть сокращена для нарушителей.

*Что может делать модель.*

*Находить равновесие:* при каких параметрах ( $k$ ,  $m$ ,  $A_i$ , Компенсация $_i$ ) всем странам становится выгодно сотрудничать и соблюдать правила, а не действовать в одиночку.

*Проводить анализ чувствительности:* что будет, если изменится климат (распределение  $R$  сместится в сторону засух) или мировые цены на хлопок/энергоносители (изменится «Выгода» в функции полезности).

*Оптимизировать параметры:* подобрать такие размеры штрафов  $k$ , компенсаций  $m$  и страховых взносов  $A_i$ , которые приведут систему к желаемому состоянию с минимальными затратами для всех участников.

## **Заключение**

Применение комбинированных моделей штрафов и страхования представляет собой современный и необходимый подход к восстановлению экосистемы Аральского моря. Ключевым фактором их успешной реализации является учет межгосударственного контекста, который трансформирует национальные механизмы в систему межгосударственных компенсаций и страховых пулов. Предложенная математическая модель показывает, что синергия этих инструментов позволяет создать устойчивую систему стимулов и управления рисками. Формализация взаимодействий в виде многоагентной системы открывает путь к количественному анализу сценариев, оптимизации параметров и достижению кооперативного равновесия, выгодного для всех стран бассейна. Выводы с рядом оговорок могут быть использованы для российских водных ресурсов.

Литература:

1. *Агасандян Г.А., Гасанов И.И., Ерешко Ф.И.* Новые подходы в проблеме комплексного управления водными ресурсами. – М: ВЦ РАН, 2003. – 54 с.
2. *Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Кулик О.С., Новиков Д.А.* Механизмы страхования в социально-экономических системах. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 109 с.

---

Тимме Е.А.

**Математическая модель влияния факторов космического полета на качество деятельности космонавта и формирования эргономического риска**

**Аннотация:** В статье представлена математическая модель формирования и оценки эргономического риска, основанная на дозовом подходе к воздействию факторов космического полета. Модель включает систему дифференциальных уравнений для описания динамики дозовых нагрузок и их влияния на качество деятельности космонавта, вероятность ошибок, тяжесть их последствий.

**Ключевые слова:** космический полет, эргономический риск, человеческий фактор, качество деятельности космонавта, вероятность ошибочных действий

Современные космические миссии (орбитальные, лунные, марсианские) представляют собой крупномасштабные системы, состоящие из многих технически сложных звеньев как в космосе, так и на Земле. Традиционно фокус безопасности сосредоточен на надежности аппаратуры и программного обеспечения системы. В то же время, человек становится самым уязвимым и непредсказуемым звеном в этой системе. Безопасность экипажа напрямую определяет успех и выживаемость всей космической миссии [1].

Обеспечение безопасности длительных космических миссий к Луне и Марсу требует разработки количественных методов оценки и прогнозирования влияния факторов космического полета на работоспособность экипажа и качество его деятельности [2].