

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова

В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Щепкин

**МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ**

Под редакцией академика С.Н. Васильева



Москва
Физматлит
2008

ББК 32.81
Б 91
УДК 519

В.Н. БУРКОВ, Д.А. НОВИКОВ, А.В. ЩЕПКИН **Механизмы управления эколого-экономическими системами** / Под ред. академика С.Н. Васильева. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 244 с.

Монография содержит результаты разработки и исследования комплекса оптимизационных, теоретико-игровых и имитационных моделей механизмов управления эколого-экономическими системами, включающего механизмы: комплексного оценивания интегрального риска и ущерба, штрафов, платы за риск, финансирования снижения уровня риска, компенсации затрат на снижение уровня риска, продажи квот на уровень риска, аудита, снижения ожидаемого ущерба, экономической мотивации, оптимизации региональных программ, согласования интересов органов управления.

Работа рассчитана на студентов ВУЗов, аспирантов и специалистов по математическому моделированию и управлению эколого-экономическими, социально-экономическими и организационными системами.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Кульба

Утверждено к печати Редакционным советом Института

ISBN 9785-94052-149-5

© Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В., 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Управление уровнем риска в эколого-экономических системах.....	33
1.1. Природные и техногенные риски.....	33
1.2. Методы оценки уровня риска.....	40
1.3. Механизмы оптимизации программ снижения уровня риска.....	43
ГЛАВА 2. Механизмы управления на уровне предприятия	65
2.1. Механизмы штрафов	68
2.2. Механизмы платы за риск	79
2.3. Механизмы финансирования снижения уровня риска	85
2.4. Механизмы компенсации затрат на снижение уровня риска	87
2.5. Механизмы страхования.....	96
2.6. Механизмы аудита	105
2.7. Механизмы снижения ожидаемого ущерба	109
ГЛАВА 3. Механизмы управления на региональном уровне....	118
3.1. Модель управления уровнем экологической безопасности в регионе.....	119
3.2. Механизмы платы за риск	129
3.3. Механизмы финансирования снижения уровня риска	133
3.4. Механизмы компенсации затрат на снижение уровня риска	136
3.5. Механизмы продажи квот на уровень риска	138
3.6. Механизмы страхования.....	146
3.7. Механизмы экономической мотивации	159
3.8. Механизмы согласования интересов органов управления	167
ГЛАВА 4. Имитационные модели механизмов управления эколого-экономическими системами.....	173
4.1. Игровое имитационное моделирование механизмов управления	173
4.2. Имитационная игра «Механизмы платы за риск».....	178
4.3. Имитационная игра «Механизмы стимулирования снижения уровня риска».....	187
4.4. Имитационная игра «Механизмы финансирования снижения уровня риска».....	191

4.5. Имитационная игра «Механизмы компенсации затрат на снижение уровня риска»	207
4.6. Имитационная игра «Механизмы продажи квот на уровень риска»	210
Заключение	218
Приложение 1. Терминология.....	220
Приложение 2. Основные обозначения и сокращения.....	227
Литература.....	230
Сведения об авторах	243

ПРЕДИСЛОВИЕ

Земля – это общий дом всего человечества, в котором человечество живет, производит необходимые для жизни продукты и, как следствие этой деятельности, загрязняет окружающую среду (почву, воду, воздух).

Не вызывает сомнений, что, если во главу угла поставить экономическую деятельность (увеличение валового продукта, прибыль и т.д.) и не обращать должного внимания на сохранение окружающей среды, то это неминуемо приведет к катастрофе. Много лет назад была разработана простая деловая игра, иллюстрирующая сказанное. Несколько участников живут в замкнутом регионе. Их деятельность характеризуется двумя показателями – получаемый ими доход и загрязнение окружающей среды вследствие деятельности участника, пропорциональное получаемому доходу. Если суммарное загрязнение не превышает критической величины, то все нормально. Если же критический уровень превышен, то общество гибнет. Довольно быстро (после двух, трех партий с гибелью) участники приходят к выводу о необходимости введения определенных правил (механизмов), ограничивающих уровень загрязнения окружающей среды и гарантирующих устойчивое функционирование. Вот здесь то и начинается самое сложное. Какие правила предложить и как обосновать их выполнение всеми участниками? Проблема в том, что эти правила должны быть одобрены и приняты всеми.

Человечество осознало необходимость равновесия между экономикой и экологией в 70-х годах XX века, когда появилась идея разработки Всемирной стратегии охраны природы. Прошло около двадцати лет, пока эта идея не реализовалась в виде стратегии устойчивого развития, принятой в 1992 г. на Всемирной конференции по окружающей среде и развитию. Однако от стратегии до реальной и эффективной системы механизмов громадное расстояние. Если говорить кратко, то в целом задача разработки эффективных механизмов, обеспечивающих устойчивое развитие, в мире пока не решена.

В России в 1996 году была утверждена Концепция перехода Российской Федерации к устойчивому развитию, в соответствии с которой одним из основных направлений перехода России к устойчивому развитию является: создание экономических механизмов регулирования природопользования и охраны окружающей среды, разработка системы стимулирования хозяйственной деятельности и установление пределов ответственности за ее экологические результаты, при которых биосфера воспринимается уже не только как поставщик ресурсов, а как фундамент жизни, сохранение которого должно быть

непременным условием функционирования социально-экономической системы и ее отдельных элементов.

В начале 90-х годов была принята Государственная научно-техническая программа «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска природных и техногенных катастроф» (ГНТП «Безопасность»), одной из основных задач которой было создание комплекса экономических механизмов обеспечения безопасности.

Проблемам научного обоснования эколого-экономических решений, в том числе с учетом социальных критериев, в последнее десятилетие посвящены несколько монографий. Назовем некоторые из тех, к которым мы имеем непосредственное отношение: В.А. Акимов, И.И. Кузьмин, Н.А. Махутов «Методы оптимизации в управлении риском»; Г.С. Голицын, Ю.В. Гуляев, А.П. Курковский, Н.А. Махутов, К.В. Фролов «Методологические и информационные основы оценки текущего состояния регионов и системные подходы к определению возможных стратегий перехода к устойчивому развитию» – разделы 5.5 и 9.1 в книге «Новая парадигма развития России в XXI веке. Комплексные исследования проблем устойчивого развития: идеи и результаты / Под ред. В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашова. – М.: Academia, 2000. – 397 с.»; «Безопасность России. – М.: МГФ «Знание», 1997-2007. Т. 1-32.»; «Природные опасности России. – М.: Крук, 1998-2004. Т. 1-6.» и «Моделирование и управление процессами регионального развития / Под ред. С.Н. Васильева. – М.: Физматлит, 2001. – 432 с.».

Предлагаемая читателям книга посвящена не только эколого-экономическим проблемам, но и содержит постановки задач управления организационными и социально-экономическими системами, описание механизмов управления безопасностью, методов анализа их эффективности, а также рекомендации по применению этих механизмов на практике.

Авторы книги – специалисты по управлению в организационных, социально-экономических и эколого-экономических системах, основные исполнители проекта «Экономические механизмы обеспечения безопасности» ГНТП «Безопасность». Книга, безусловно, будет полезна как научным работникам, специалистам, так и студентам и аспирантам, вообще – всем, кто так или иначе связан с разработкой и реализацией моделей, методов и механизмов управления организационными и социально-эколого-экономическими системами.

*Академик РАН
С.Н. Васильев*

*Член-корреспондент РАН
Н.А. Махутов*

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Конституцией Российской Федерации каждый имеет право на благоприятную *окружающую среду*¹, каждый обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации.

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» [151] определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды, обеспечивающие сбалансированное решение социально-экономических задач, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов в целях удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности; регулирует отношения в сфере взаимодействия общества и природы, возникающие при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, связанной с воздействием на природную среду.

Устойчивое развитие. Впервые термин «*устойчивое развитие*» (sustainable development) был использован в 80-х годах XX века. Стратегия устойчивого развития была принята в 1992 году на всемирной конференции по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро), где устойчивое развитие было определено как процесс, отвечающий потребностям настоящего, но не лишаящий будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности (то есть развитие, позволяющее на долговременной основе обеспечить стабильный экономический рост, не приводящий к деградационным изменениям окружающей среды).

Основой стратегии устойчивого развития является идея равновесия между окружающей средой и ее ресурсами, экономикой и населением Земли. Цель Стратегии устойчивого развития – выработать основные пути и способы приспособления жизни к глобальным изменениям. Согласно этой цели, каждый человек имеет право на здоровую окружающую среду, на плодотворную жизнь в гармонии с природой.

Указом Президента Российской Федерации от 1 апреля 1996 года была утверждена Концепция перехода РФ к устойчивому разви-

¹ Определения основных используемых терминов приведены в Приложении 1.

тию [142] (см. также [141]). В Концепции под устойчивым развитием понимается стабильное социально-экономическое развитие, не разрушающее своей природной основы. Эта концепция подразумевает переход России к устойчивому развитию, обеспечивающему решение социально-экономических задач и проблем сохранения благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала в целях удовлетворения нынешнего и будущих поколений людей.

Проблемы устойчивого развития обсуждались в работах Н.Н. Моисеева [83-86], В.А. Коптюга и В.М. Матросова [62, 90], В.И. Данилова-Данильяна [53] и других авторов, в том числе – на базе концепции глобального моделирования [133, 152, 165, 173].

Управление уровнем риска. Проблемы устойчивого развития тесно связаны с проблемами управления безопасностью и/или риском. В решении же проблем безопасности исключительно важна экономическая составляющая. И дело даже не в том, чтобы правильно посчитать или спрогнозировать ущерб от аварий и катастроф, хотя это, конечно, необходимо уметь делать. Гораздо важнее построить и ввести в действие эффективные организационные и экономические механизмы стимулирования практической деятельности по предупреждению возникновения *чрезвычайных ситуаций* (ЧС) и привлечения требующихся для этого немалых инвестиций. Эффективность применения экономических механизмов напрямую зависит от той цены, которую общество готово заплатить за свою безопасность. Например, чем выше возможные потери от возникновения ЧС, тем больше величина экономического эффекта от ее предотвращения.

На региональном и объектовом уровне создаются системы поддержки принятия управленческих решений, включающие в себя экономические модели, методики и программные средства обеспечения живучести и безопасной эксплуатации сложных технических систем и особо опасных производств, стабильности работы отраслей и административных систем управления.

На практике это, в частности, выражается в составлении планов развития предприятий с учетом требований безопасности. При этом осуществляется соответствующая экономическая проработка не только по вопросам технического перевооружения и совершенствования технологических процессов, но и по выполнению компенсационных мероприятий в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

В числе наиболее распространенных, по отношению к деятельности предприятий в области безопасности, следует назвать такие экономические механизмы как: плата за риск, квотирование риска, перераспределение риска, стимулирование снижения риска.

Экономические механизмы федерального и территориального уровней управления, используемые для решения задач защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, предусматривают планирование, нормирование и финансирование мероприятий по безопасности объектов и территорий. В частности, установление платы и размеров платежей за использование территорий под размещение объектов, потенциально опасных для здоровья и имущества проживающего населения, за возможный ущерб окружающей природной среде. Распространена практика предоставления предприятиям, организациям и гражданам налоговых, кредитных и иных льгот при реализации ими мер по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций, смягчению их последствий.

Эффективной формой государственного регулирования безопасности являются договоры и лицензии на использование, строительство, переоборудование потенциально опасных объектов, которые заключаются между инвестором или пользователем объекта и органом исполнительной власти субъекта Российской Федерации. Подобного рода документы оформляются на основании заключения экспертизы МЧС России на уровень потенциальной опасности намечаемой хозяйственной или иной деятельности, а также при наличии лицензии (разрешения) на право ведения такой деятельности. Указанный договор обладает весьма широкими экономико-правовыми возможностями. Он предусматривает условия использования природных ресурсов, права и обязанности инвестора или пользователя потенциально опасного объекта, размеры платежей за обусловленный уровень риска, ответственность сторон, порядок возмещения ущерба и разрешения возможных споров.

Лицензия (разрешение) на право ведения того или иного рода деятельности, выдается собственнику особо опасного объекта специально уполномоченными на это государственными органами Российской Федерации. В лицензии указываются виды, объемы и допустимые лимиты хозяйственной деятельности, а также требования по обеспечению безаварийности потенциально опасных производств и социально-экономические последствия их несоблюдения.

Лимиты являются системой социально-экономических ограничений потенциально опасной деятельности и представляют собой

установленные на определенный срок предприятиям предельно допустимые объемы (стоимостные оценки) возможного социально-экономического ущерба от чрезвычайной ситуации на данной территории. Лимиты формируются, исходя из необходимости поэтапного снижения уровня риска до предельно допустимого, с учетом экологической обстановки в регионе и степени его экономического развития.

Плата за возможные социально-экономические последствия чрезвычайных ситуаций включает в себя стоимость возможного ущерба экономике, окружающей природной среде, системам жизнеобеспечения населения, здоровью людей, а также размеры выплат за право вести потенциально опасную, сверхлимитную и нерациональную опасную деятельность. Порядок исчисления и применения нормативов платы за возможный социально-экономический ущерб от деятельности потенциально опасных объектов определяется Правительством Российской Федерации.

Заметную роль в решении задач регулирования безопасности играет существующая в стране система фондов, объединяющая федеральный чрезвычайный страховой фонд, страховые фонды субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления. Такие фонды аккумулируют средства предприятий и организаций, отечественных и зарубежных юридических и физических лиц, в том числе: платы в связи с последствиями чрезвычайных ситуаций; суммы по искам о возмещении ущерба и штрафов за правонарушения; средства от реализации произведенной на потенциально опасных объектах и конфискованной продукции; ассигнования, полученные в виде дивидендов, процентов по вкладам, банковским депозитам, от долевого использования собственных средств фонда в деятельности предприятий и других юридических лиц.

Ресурсы государственных чрезвычайных страховых фондов расходуются на разработку и реализацию мер по снижению опасности стихийных бедствий и ущерба окружающей природной среде, компенсации материальных потерь в экономике, выплаты по социальным гарантиям пострадавшим гражданам в связи с потерей имущества и нарушениями здоровья, на научные исследования, образование и иные цели, связанные решением проблем безопасности.

По решению органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации нередко создаются внебюджетные негосударствен-

ные фонды за счет средств населения, добровольных взносов, пожертвований общественных организаций и других источников.

Экономические и финансовые механизмы. Важной задачей является экономическое регулирование рыночных отношений в целях рационального неистощительного природопользования, снижения нагрузки на природную среду, ее охраны, привлечения бюджетных и внебюджетных средств на природоохранную деятельность. Для этого необходимы [123]:

- ♦ обеспечение перехода в сфере природопользования к системе рентных платежей; включение в экономические показатели полной стоимости природных объектов с учетом их средообразующей функции, а также стоимости природоохранных (экологических) работ (услуг);

- ♦ создание полноценного механизма взимания с хозяйствующих субъектов, эксплуатирующих природные ресурсы, платежей, и их использование на сохранение и восстановление природной среды, в том числе, биоразнообразия; реализация в полной мере принципа «загрязнитель платит»;

- ♦ обеспечение зависимости размеров платы за выбросы и сбросы от их объема, опасности для окружающей среды и здоровья населения;

- ♦ разработка научно обоснованной методики определения размера компенсаций за ущерб, наносимый окружающей среде и здоровью граждан в процессе хозяйственной деятельности, при техногенных и природных чрезвычайных ситуациях, а также в результате экологически опасной деятельности, в том числе военной, обеспечение обязательной компенсации экологического ущерба окружающей среде и здоровью населения;

- ♦ обеспечение адекватного бюджетного финансирования охраны окружающей среды как одного из приоритетных направлений деятельности государства;

- ♦ создание системы финансирования природоохранных работ на конкурсной основе за счет средств бюджетов всех уровней и внебюджетных источников;

- ♦ формирование и применение налоговой и тарифной политики, стимулирующей переориентацию экспорта с сырья на продукты глубокой переработки; создание и применение системы налогов и пошлин, стимулирующих использование экологически чистых технологий, товаров и услуг независимо от страны производителя;

◆ совершенствование механизмов изменения форм собственности и купли – продажи земли, природных ресурсов и хозяйственных объектов с учетом задач сохранения и восстановления природной среды (включая оценку прошлого экологического ущерба, обязательства по проведению реабилитационных мероприятий и др.);

◆ установление механизма финансовых гарантий, включая экологическое страхование, связанных с возможным негативным воздействием на окружающую среду;

◆ содействие развитию экологического аудита действующих предприятий, предпринимательству в сфере охраны окружающей среды и добровольной сертификации;

◆ внедрение рыночных механизмов охраны природы, в том числе, стимулирующих повторное использование и вторичную переработку промышленных товаров;

◆ введение ответственности производителя за произведенный продукт на всех стадиях – от получения сырья и производства до утилизации; создание условий для внедрения системы лизинга экологически безопасных промышленных товаров длительного пользования, в том числе для личных нужд;

◆ использование схем международных финансово-экономических расчетов с учетом вклада стран в обеспечение глобальной устойчивости биосферы («долги за природу», углеродный кредит и другие механизмы, предусматриваемые международными конвенциями и соглашениями);

◆ формирование условий для стимулирования благотворительности в области охраны природы.

Законодательством Российской Федерации и субъектов Российской Федерации предусматриваются различные виды экономического стимулирования деятельности по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций и смягчения их возможных последствий.

К числу наиболее популярных льгот, предоставляемых государством, относятся:

- льготы по налогообложению;

- передача на договорных условиях части средств, принадлежащих чрезвычайным страховым фондам под процентные займы предприятиям, учреждениям, организациям и гражданам для реализации мер по гарантированному снижению социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций;

- установление повышенных норм амортизации основных производственных фондов предприятий, организаций, учреждений, чрезвычайных страховых фондов;

- применение поощрительных цен и надбавок на продукцию, производимую на предприятиях, снижающих риск чрезвычайных ситуаций и смягчающих последствия аварий и катастроф;

- введение специального налогообложения продукции, производимой на потенциально опасных объектах с применением опасные технологии;

- применение льготного кредитования организаций, предприятий и учреждений независимо от форм собственности, эффективно осуществляющих деятельность по снижению опасности производства.

В России в настоящий момент осуществляется добровольное и обязательное государственное страхование предприятий, учреждений и организаций, объектов их собственности и доходов, а также граждан, на случай возникновения чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера. Средства, образующиеся в результате страховой деятельности, используются на осуществление превентивных мероприятий и компенсацию ущерба. Порядок страхования и перестрахования рисков и использования средств устанавливается Правительством Российской Федерации.

Финансирование программ и мероприятий по снижению опасности и компенсации возможного ущерба производится за счет федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, а также из средств предприятий и организаций, резервов финансовых ресурсов, внебюджетных фондов, кредитов банков, добровольных взносов населения, инвестиций.

Институциональные основы управления эколого-экономическими системами. В соответствии с [151, Ст. 4], объектами охраны окружающей среды от загрязнения, истощения, деградации, порчи, уничтожения и иного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности являются: земли, недра, почвы; поверхностные и подземные воды; леса и иная растительность, животные и другие организмы и их генетический фонд; атмосферный воздух, озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство.

В [151, Ст. 14] перечисляются следующие методы экономического регулирования в области охраны окружающей среды:

- разработка государственных прогнозов социально-экономического развития на основе экологических прогнозов;
- разработка федеральных программ в области экологического развития Российской Федерации и целевых программ в области охраны окружающей среды субъектов Российской Федерации;
- разработка и проведение мероприятий по охране окружающей среды в целях предотвращения причинения вреда окружающей среде;
- установление платы за негативное воздействие на окружающую среду;
- установление лимитов на выбросы и сбросы загрязняющих веществ и микроорганизмов, лимитов на размещение отходов производства и потребления и другие виды негативного воздействия на окружающую среду;
- проведение экономической оценки природных объектов и природно-антропогенных объектов;
- проведение экономической оценки воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду;
- предоставление налоговых и иных льгот при внедрении наилучших существующих технологий, нетрадиционных видов энергии, использовании вторичных ресурсов и переработке отходов, а также при осуществлении иных эффективных мер по охране окружающей среды в соответствии с законодательством Российской Федерации;
- поддержка предпринимательской, инновационной и иной деятельности (в том числе экологического страхования), направленной на охрану окружающей среды;
- возмещение в установленном порядке вреда окружающей среде;
- иные методы экономического регулирования по совершенствованию и эффективному осуществлению охраны окружающей среды.

Рассмотрим более подробно такой распространенный метод экономического регулирования, как плата за негативное воздействие на окружающую среду.

Плата за негативное воздействие на окружающую среду. В соответствии с [117] к видам негативного воздействия на окружающую среду относятся:

- выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и иных веществ;

- сбросы загрязняющих веществ, иных веществ и микроорганизмов в поверхностные водные объекты, подземные водные объекты и на водосборные площади;

- загрязнение недр, почв;

- размещение отходов производства и потребления;

- загрязнение окружающей среды шумом, теплом, электромагнитными, ионизирующими и другими видами физических воздействий;

- иные виды негативного воздействия на окружающую среду.

Порядок исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду устанавливается законодательством Российской Федерации. Внесение платы не освобождает субъектов хозяйственной и иной деятельности от выполнения мероприятий по охране окружающей среды и возмещения вреда окружающей среде.

Согласно [105] платежи за негативное воздействие на окружающую среду носят компенсационный характер и взимаются за предоставление субъектам (юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям) хозяйственной и иной деятельности, оказывающей негативное воздействие на окружающую среду, права производить в пределах допустимых нормативов выбросы и сбросы загрязняющих веществ, размещать отходы и оказывать иные виды негативного воздействия.

Министерство природных ресурсов Российской Федерации по согласованию с Министерством экономического развития и торговли Российской Федерации и Министерством финансов Российской Федерации может вносить уточнения в указанные нормативы платы и коэффициенты в связи с изменением экологической ситуации в отдельных регионах и уровня цен, а также при установлении новых видов загрязняющих веществ и вредных воздействий на окружающую природную среду.

Нормативы платы за выброс и т.п. 1 тонны загрязняющих веществ устанавливаются [118]. К нормативам платы применяются *поправочные коэффициенты*, в том числе:

– коэффициенты, учитывающие экологические факторы (состояние атмосферного воздуха);

– коэффициент для особо охраняемых природных территорий, в том числе лечебно-оздоровительных местностей и курортов, а также для районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей, Байкальской природной территории и зон экологического бедствия;

- коэффициенты, установленные законами о федеральном бюджете на соответствующий год;
- коэффициент за выбросы вредных веществ в атмосферный воздух городов.

Нормативы платы определяются в зависимости от соотношения фактических размеров загрязнения и нормативов (см. нормативы качества окружающей среды на Рис. 1).



Рис. 1. Нормативы качества окружающей среды [160]

Согласно [77, 117], плата за загрязнение окружающей природной среды в размерах, не превышающих установленные плательщику *предельно допустимые выбросы* (ПДВ), определяется путем умножения соответствующих нормативов платы² λ – см. жирную линию на Рис. 2, на массы фактических выбросов по каждому загрязняющему веществу (при условии непревышения фактических выбросов над утвержденными нормативами ПДВ) и суммирования полученных произведений.

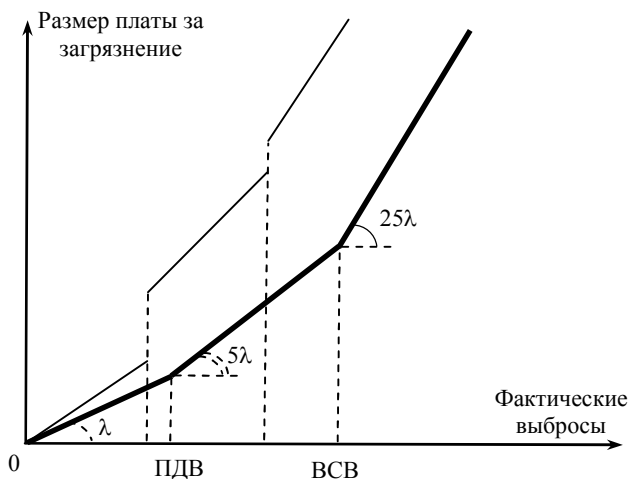


Рис. 2. Зависимость платы за загрязнение окружающей природной среды от фактических выбросов [117]
(с точностью до произведения поправочных коэффициентов)

Плата за загрязнение окружающей природной среды в размерах, не превышающих установленные плательщику *временно согласованные выбросы* (ВСВ), определяется путем умножения нормативов платы 5λ – см. жирную линию на Рис. 2 – на разницу показателей лимитного выброса и выброса в пределах утвержденных нормативов ПДВ и суммирования полученных результатов. При этом под лимитным выбросом понимается масса фактического выброса загрязняющего вещества в пределах установленного ВСВ.

² Плата за выбросы при превышении (отсутствии) установленных ПДВ, в том числе при отсутствии (превышении) установленных ВСВ, рассчитывается как сверхлимитная.

При сверхлимитном загрязнении плата в пределах лимита определяется путем умножения соответствующих нормативов платы на разницу установленных показателей лимитного выброса и выброса в пределах утвержденных нормативов ПДВ и суммирования полученных результатов. Плата за сверхлимитное загрязнение окружающей природной среды определяется путем умножения соответствующих нормативов платы за загрязнение в пределах установленных лимитов на величину превышения фактической массы выбросов над установленными ВСВ, суммирования полученных результатов и умножения этих сумм на пятикратный повышающий коэффициент – см. жирную линию на Рис. 2.

Примером исследования задачи оптимизации системы платы за загрязнение является работа [79], в которой функция платы за загрязнение искалась в классе кусочно-линейных возрастающих функций с двумя «скачками» – см. тонкую линию на Рис. 2. В результате были определены параметры (точки «скачков», величины «скачков» и углы наклона), при которых действия, выгодные для предприятия, стремящегося максимизировать свою остаточную прибыль, одновременно выгодны и для управляющего органа, который стремится обеспечить определенный эффективный по Парето баланс между объемом выпускаемой предприятием продукции и величиной загрязнений.

Меры воздействия. Помимо платы за пользование природными ресурсами – Рис. 3, действующее российское законодательство предусматривает следующие меры (см. также Рис. 4).

1) Плата за негативное воздействие на окружающую среду [151, Ст. 16] – см. выше.

2) Ответственность за нарушение законодательства в области охраны окружающей среды – за нарушение законодательства в области охраны окружающей среды устанавливается имущественная, дисциплинарная, административная [58, Глава 8] и уголовная ответственность [134, Глава 26] в соответствии с законодательством [151, Ст. 75]. Данные нормы носят скорее констатирующий, а не предупредительный характер и применяются, в основном, к должностным лицам (или к юридическим лицам при установлении разовых фактов нарушения соответствующих нормативов).

3) Обязанность полного возмещения вреда окружающей среде – юридические и физические лица, причинившие вред окружающей среде в результате ее загрязнения, истощения, порчи, уничтожения, нерационального использования природных ресурсов, деградации и

разрушения естественных экологических систем, природных комплексов и природных ландшафтов и иного нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обязаны возместить его в полном объеме в соответствии с законодательством [151, Ст. 77].

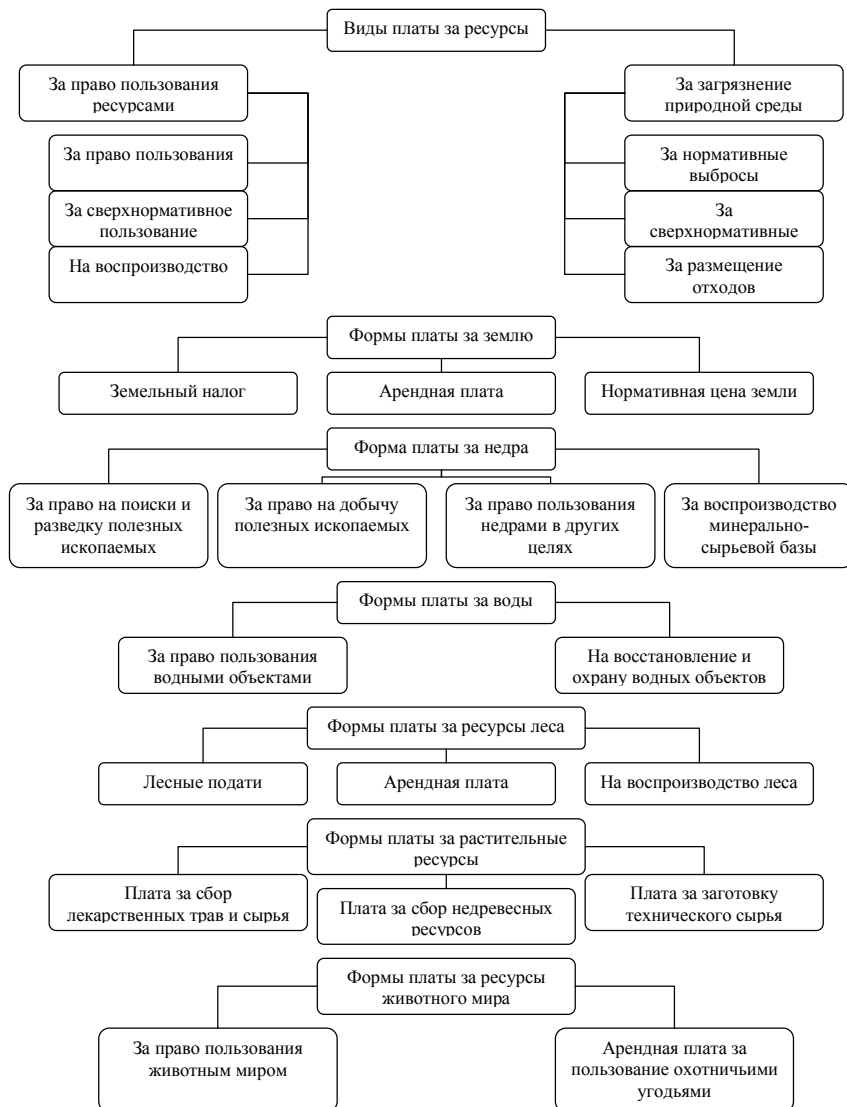


Рис. 3. Платность природных ресурсов России [160]

4) Возмещение вреда, причиненного здоровью и имуществу граждан в результате нарушения законодательства в области охраны окружающей среды – вред, причиненный здоровью и имуществу граждан негативным воздействием окружающей среды в результате хозяйственной и иной деятельности юридических и физических лиц, подлежит возмещению в полном объеме [151, Ст. 79].

5) Согласно закону [151, Ст. 14] предприятиям предоставляются налоговые и иные льготы при внедрении наилучших существующих технологий, нетрадиционных видов энергии, использование вторичных ресурсов и переработке отходов, а также при осуществлении иных эффективных мер по охране окружающей среды в соответствии с законодательством Российской Федерации.

6) Экологическое страхование – «В Российской Федерации может осуществляться обязательное государственное экологическое страхование» [151, Ст. 18.2].

7) Обязательное страхование ответственности за причинение вреда при эксплуатации опасного производственного объекта [150, Ст. 15].



Рис. 4. Экономические механизмы охраны окружающей среды

Следует признать, что нормы 5-6 практически «не работают». С одной стороны, для полноценного использования комплекса экономических механизмов (в том числе – мер воздействия) требуется соответствующая корректировка законодательства (см. обсуждение проблем экологического права в [15]). Поэтому большинство описы-

ваемых в настоящей работе организационных и экономических механизмов управления эколого-экономическими системами носит «модельный» характер. С другой стороны, эти механизмы (точнее – соответствующие модели) могут быть использованы (и фактически использовались при непосредственном участии авторов в рамках Федеральной программы «Безопасность») при подготовке и анализе предложений о разработке соответствующих нормативно-правовых актов.

Эколого-экономические системы: базовая модель. Настоящая работа посвящена математическим моделям управления *эколого-экономическими системами* (ЭкЭС), под которыми будем понимать³ «совокупность взаимосвязанных экономических, технических, социальных и природных факторов в окружающем человека мире» [12], «интеграцию экономики и природы, представляющую собой взаимосвязанное и взаимообусловленное функционирование производства и протекание естественных процессов в природе» [69].

*Экологические системы*⁴ [120, 129] являются предметом исследований различных отраслей науки: биологии, медицины, физики, химии, математики, экономики, социологии. В последнее время, в качестве самостоятельного раздела менеджмента стал выделяться *экологический менеджмент* [4, 5, 41, 71, 89, 125, 130, 181].

Более общим (по соотношению к ЭкЭС) является понятие социально-эколого-экономической системы [81] – см. Рис. 5.

С этой точки зрения экологические, экономические, организационные и социальные системы, а также социально-экономические, эколого-экономические и др. системы являются подсистемами социально-эколого-экономической системы. В настоящей работе рассматривается комбинация элементов «государство – экономика – природа». При этом государство считается выразителем социальных и «эколого-биологических» потребностей и интересов общества и

³ На сегодняшний день не существует общепринятого определения «эколого-экономической системы», тем не менее, все известные определения достаточно близки по своей сути.

⁴ Термин «экология» был введен Эрнстом Геккелем в 1866 г. для обозначения науки о взаимодействиях организма и среды. В современной экологии можно выделить, как минимум, две группы задач и соответствующие им подходы: популяционный подход – изучение механизмов, определяющих распространение организмов, их обилие и его изменение во времени; экосистемный подход – изучение протекающих с участием организмов процессов трансформации вещества и энергии в экосистемах и биосфере.

личности, а экономика – выразителем экономических интересов личности.

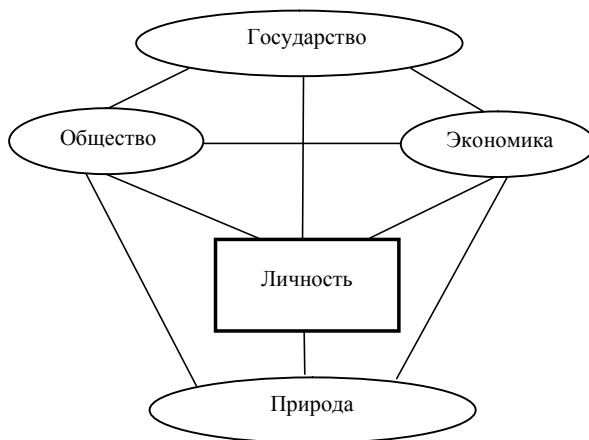


Рис. 5. Субъекты социально-эколого-экономической системы

Как и к любой сложной системе, к ЭкЭС применимы множество методов исследования. В настоящей работе используется такой метод, как моделирование, причем объектом моделирования являются механизмы управления ЭкЭС. В силу чрезвычайной важности для настоящей работы этих двух понятий – «модель» и «механизм», остановимся на них более подробно.

Совокупность процедур и правил, регламентирующих взаимодействие участников некоторой (организационной, социально-экономической, эколого-экономической) системы называется *механизмом её функционирования* – см. [98] (механизм – «система, устройство, определяющее порядок какого-либо вида деятельности» [Словарь иностранных слов. – М.: Русский язык, 1982. – с. 283]). Более узким является понятие *механизма управления* – совокупности процедур принятия управленческих решений. Таким образом, механизмы функционирования и механизмы управления определяют, как ведут себя участники⁵, и как они принимают решения. Отметим, что в соответствии с [116, Ст. 2.3], одна из функций органов государст-

⁵ С этой точки зрения механизм управления можно рассматривать как синоним метода управления, так как и тот, и другой определяют, как осуществляется управление.

венной власти – «разработка и внедрение экономических механизмов охраны окружающей природной среды в целях стимулирования рационального природопользования».

Наличие в системе определенной совокупности конкретных механизмов управления привлекательно как с точки зрения управляющего органа – так как позволяет предсказать поведение управляемых субъектов, так и с точки зрения управляемых субъектов – так как делает предсказуемым поведение управляющего органа. То есть, снижение неопределенности за счет использования механизмов управления является одним из существенных свойств любой организованной системы.

Для того чтобы управляющий орган выбрал ту или иную процедуру принятия решений (тот или иной механизм управления, то есть зависимость своих действий от целей системы и действий управляемых субъектов), он должен уметь предсказывать поведение «подчиненных» – их реакцию на те или иные управляющие воздействия. Экспериментировать в жизни, применяя различные управляющие воздействия и изучая реакции управляемой системы, не эффективно и практически никогда не представляется возможным. Здесь на помощь приходит *моделирование* – метод исследования, заключающийся в построении и анализе моделей⁶ – аналогов исследуемых объектов. Имея адекватную модель, можно с ее помощью проанализировать реакции управляемой системы (этап анализа), а затем выбрать (на этапе синтеза) и использовать на практике то управляющее воздействие, которое приводит к требуемой реакции.

Функции моделирования (дескриптивная, прогностическая и нормативная) совпадают с функциями научного знания [35].

Дескриптивная функция моделирования заключается в том, что за счет абстрагирования модели позволяют достаточно просто объяснить наблюдаемые на практике явления и процессы (другими словами, они дают ответ на вопрос «почему мир устроен так»). Успешные в этом отношении модели становятся компонентами научных теорий и являются эффективным средством отражения содержания последних (поэтому *познавательную функцию* моделирования можно рассматривать как составляющую дескриптивной функции).

⁶ Модель – образ некоторой системы; аналог (схема, структура, знаковая система) определенного фрагмента природной или социальной реальности, «заместитель» оригинала в познании и практике [Философский энциклопедический словарь. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – с. 382].

Прогностическая функция моделирования отражает его возможность предсказывать будущие свойства и состояния моделируемых систем, то есть отвечать на вопрос «что будет?».

Нормативная функция моделирования заключается в получении ответа на вопрос «как должно быть?» – если, помимо состояния системы, заданы критерии оценки ее состояния, то за счет использования оптимизации возможно не только описать существующую систему, но и построить ее нормативный образ – желательный с точки зрения субъекта, интересы и предпочтения которого отражены используемыми критериями.

Нормативная функция моделирования тесно связана с решением задач *управления*, то есть, с ответом на вопрос «как добиться желаемого (состояния, свойств системы и т.д.)?».

Завершив краткое обсуждение определений и функций моделей и механизмов, перейдем к описанию принятой в настоящей работе **базовой модели эколого-экономической системы** – см. Рис. 6. Данная модель включает три типа участников ЭкЭС⁷:

- управляющие органы (называемые в дальнейшем «*центр*»);
- экономические агенты (называемые в дальнейшем «*предприятие*»);
- *окружающая среда*.

Управляющие органы заинтересованы как в «экономических» достижениях управляемых предприятий, так и в обеспечении требуемого уровня безопасности (или минимизации до требуемых границ уровня риска и т.д.). Их возможности заключаются в установлении условий деятельности предприятий (назначении штрафов, предоставлении льгот и т.д. – см. ниже).

На качественном уровне задача управляющих органов заключается в выборе таких условий деятельности предприятий, которые побуждали бы последних выбирать действия, приводящие к наиболее выгодным для управляющих органов результатам.

С точки зрения задач управления, специфика ЭкЭС заключается, в том числе, в следующем:

- результаты деятельности управляемых субъектов многоаспектны (имеются, как минимум, две составляющих результатов – «экономическая» и «экологическая») и подвержены воздействию

⁷ «Границы» системы определяются выбранным масштабом рассмотрения – объектовым, территориальным, региональным и т.д.

множества неконтролируемых, неопределенных и случайных факторов;

- интересы различных управляющих органов могут не только не совпадать с интересами предприятий, но и противоречить друг другу;



Рис. 6. Структура базовой модели ЭкЭС

- затраты на регулярное получение достоверной и полной информации достаточно велики;

- ЭкЭС не могут самостоятельно отстаивать свои интересы, их реакция носит инерционный характер и происходит с задержкой [140];

- существенными, а во многом и решающими, являются институциональные ограничения (нормативно-правовая база) деятельности предприятий и их взаимодействия с управляющими органами.

Перечисленные характеристические особенности ЭкЭС требуют своего учета при разработке соответствующих механизмов управления (см. модели во второй и третьей главах).

Итак, можно перечислить ключевые отличия принятых в настоящей работе подходов⁸ от:

- экологии – считается известной зависимость состояния окружающей среды от воздействующих на нее результатов ПХД;
- менеджмента – рассматриваются формальные модели;
- экологического мониторинга – система мониторинга и обработки его результатов считается фиксированной и досточной для принятия управленческих решений (за исключением аспектов достоверности информации, исследуемых в настоящей работе при разработке неманипулируемых механизмов);
- теории управления социально-экономическими и организационными системами – учитываются не только результаты ПХД, но и состояние окружающей среды, обусловленное этими результатами (если на Рис. 6 «отбросить» окружающую среду и не учитывать ее состояние, то получим структуру системы управления, традиционную для теории управления организационными системами – см. [98]).

Несмотря на то, что в настоящей работе строятся и анализируются и оптимизационные, и теоретико-игровые, и имитационные модели, основным инструментом исследования является *теория игр* [34, 52, 111, 167, 174], в основном – *иерархические игры* [39, 45, 46, 66].

На сегодняшний день известны следующие основные российские научные школы, развивающие теоретико-игровые модели механизмов управления ЭкЭС:

- ВЦ РАН [39, 45, 46, 66, 82, 85, 111];
- ВЦ СО РАН и ИДСТУ РАН [36, 62, 67, 78-80, 161, 182];
- ИПУ РАН [13, 17, 19, 30-32, 60, 61, 94-96, 101-104, 157-159];
- Ростовский государственный (ныне Южный федеральный) университет [47, 48, 135-140, 145];
- Санкт-Петербургский государственный университет [109-111].

Первоначальное впечатление об этом направлении заинтересованный читатель может получить, ознакомившись с монографиями [17, 46, 79, 109, 140], в которых рассмотрены теоретико-игровые и динамические оптимизационные модели стимулирования природоохранной деятельности, стимулирования снижения вредных выбро-

⁸ С методической точки зрения можно также выделить стремление к получению, быть может иногда в ущерб общности, аналитических результатов с прозрачными содержательными интерпретациями.

сов предприятий, частичной компенсации природоохранных затрат, планирования производства, нормирования выбросов, распределения ущерба от загрязнений, объединения усилий при проведении природоохранных мероприятий и др. Тесно связанными с моделями механизмов управления ЭкЭС являются следующие классы моделей:

- модели региональных ЭкЭС, которые, как правило, включают блоки, описывающие (как по отдельности, так и во взаимодействии) водные, воздушные, земельные и биологические ресурсы [47, 79, 81, 131, 140];

- модели *мониторинга* [56, 79, 119, 136], включая как его нормативную базу, так и соответствующие механизмы, которые должны учитывать и затраты на получение информации [102, 104], и возможность сознательного искажения последней заинтересованными субъектами [23, 102];

- *имитационные модели*, в том числе – использующие аппарат эволюционных игр [34, 168];

- динамические, оптимизационные и имитационные модели экологических систем [48, 67, 74, 75, 80, 91, 107, 114, 126, 127, 133], в том числе – модели распространения загрязнений (переноса и диффузии) [73, 109, 127, 131];

- модели влияния окружающей среды на здоровье человека и, в более общем случае, социальные аспекты природоохранной деятельности [67, 78, 112, 107, 124, 131];

- математические модели биологических систем и их элементов [37, 74, 75, 76, 80, 107, 127].

Будущая интеграция перечисленных классов моделей является, несомненно, перспективной и актуальной задачей.

Классификация механизмов управления и структура изложения. Анализ отечественного и зарубежного опыта в области разработки и применения организационных и экономических механизмов управления риском/безопасностью⁹ показывает, что существует

⁹ Следует сделать важное методическое замечание: термины «риск» и «безопасность» во многом являются «двойственными» или даже функционально связанными (например, рост уровня риска приводит к снижению уровня безопасности, и наоборот). Поэтому большинство рассматриваемых ниже механизмов управления могут интерпретироваться и как механизмы управления риском, и как механизмы управления безопасностью. Более того, авторы надеются, что использование для обозначения уровня риска и уровня безопасности одной и той же переменной (см. Приложение 2) не только не приводит к путанице, но иллюстрирует тесную взаимосвязь этих двух базовых для эколого-экономических систем понятий.

достаточно большое число механизмов, направленных на снижение уровня риска (возникновения ЧС, неблагоприятного воздействия на природную среду и т.д.) [17, 30]. Все эти механизмы можно разделить на несколько групп. Каждая группа включает в себя механизмы, имеющие общие принципиальные особенности и отличающиеся друг от друга лишь некоторыми модификациями.

При исследовании механизмов управления уровнем риска (безопасности) будем считать, как это принято в *теории активных систем* [16, 20, 26, 27], что структура ЭкЭС, в которой действует механизм, является двухуровневой (см. Рис. 6). Верхний уровень занимает орган управления (как производственной, хозяйственной и иной деятельностью управляемых субъектов, так и уровнем безопасности/риска) – природоохранный орган, орган муниципальной, региональной или федеральной власти. Кроме того, на верхнем уровне могут находиться одна или несколько страховых организаций. Нижний уровень этой системы занимают объекты, деятельность которых несет в себе потенциальную угрозу возникновения ЧС. Эти объекты, несмотря на их потенциально разнообразную экономическую и организационно-правовую природу, будем в дальнейшем условно называть «*предприятия*».

Перечислим основные организационные и экономические механизмы управления уровнем природно-техногенного риска (обеспечения безопасности) в ЭкЭС [17, 31, 101, 103]. Структура системы этих механизмов приведена на Рис. 7.

Как видно из Рис. 7, особую роль играют **механизмы комплексного оценивания уровня риска/безопасности**. Это связано с тем, что параметры всех механизмов управления должны настраиваться в зависимости от наблюдаемого или измеряемого уровня риска (уровня безопасности). Оценка уровня безопасности (уровня риска) играет центральную роль при определении норм, квот, штрафов в механизмах экономической ответственности, при определении страховых взносов в механизмах страхования, при разработке планов формирования централизованных фондов и распределении бюджетных средств, наконец, при определении налоговой политики и политики льготного кредитования.

Дадим краткую характеристику основных классов механизмов.

Механизмы экономической ответственности. Эта группа механизмов включает систему стандартов (норм, нормативов, квот), отклонение от которых ведет к определенным экономическим санкциям (от штрафов до остановки производства, запрещения строи-

тельства и др.). Соответствующие стандарты касаются, в первую очередь, применяемых технологий производства (или строительства), организационно-технических мер по обеспечению безопасности производства, ограничений на предельно допустимые концентрации, выбросы или сбросы.



Рис. 7. Структура системы организационных и экономических механизмов управления риском/безопасностью в ЭкЭС

К этой же группе механизмов целесообразно отнести *механизмы экспертизы* (проектов, предприятий), в которых оценка уровня безопасности (риска) производится экспертной комиссией, и экономическая ответственность определяется в зависимости от результатов экспертизы.

Важный класс составляют механизмы возмещения ущерба, в которых экономическая ответственность прямо связана с величиной ущерба от возникновения чрезвычайной ситуации.

К механизмам экономической ответственности относятся рассматриваемые в настоящей работе *механизмы штрафов* (раздел 2.1), *механизмы платы за риск* (разделы 2.2, 3.2 и 4.2), *механизмы аудита* (раздел 2.6) – см. Табл. 1, в которой в столбцах перечислены группы механизмов (и, соответственно, решаемые ими задачи), в строках – конкретные механизмы, рассматриваемые в настоящей работе (в скобках указаны номера разделов), на пересечении соответствующих строки и столбца стоит «+», если механизм принадлежит соответствующем классу, или «●», если механизм может быть использован при решении соответствующих задач.

Механизмы стимулирования снижения уровня риска. Сюда относятся механизмы льготного налогообложения, а также льготного кредитования мероприятий по повышению уровня безопасности (снижения риска) [22, 40, 132]. К механизмам стимулирования снижения уровня риска относятся рассматриваемые в настоящей работе *механизмы финансирования снижения уровня риска* (разделы 2.3, 3.3, 4.3 и 4.4), *механизмы компенсации затрат* на снижение уровня риска (разделы 2.4, 3.4 и 4.5), *механизмы снижения ожидаемого ущерба* (раздел 2.7), *механизмы экономической мотивации* (раздел 3.7) и отчасти *механизмы согласования интересов органов управления* (раздел 3.8).

Механизмы перераспределения риска. В основном, это – механизмы страхования (государственное, независимое и взаимное страхование). Одной из важнейших проблем, возникающих при разработке механизмов страхования – это разработка процедур определения страховых тарифов [1, 23, 88]. К механизмам перераспределения риска относятся рассматриваемые в настоящей работе *механизмы страхования* (разделы 2.5 и 3.6) и отчасти – *механизмы экономической мотивации* (раздел 3.7) и *механизмы оптимизации региональных программ* (разделы 1.3 и 3.1).

Механизмы резервирования на случай чрезвычайных ситуаций. Сюда относятся механизмы образования резервов трудовых ресурсов (пожарные, спасатели и др.), материальных ресурсов (запасы продовольствия, сырья, медикаментов, транспорт и др.), мощностей для быстрой организации производства продукции, необходимой для ликвидации или уменьшения потерь от чрезвычайных ситуаций.

Табл. 1. Комплекс механизмов управления ЭкЭС

Классы механизмов	Механизмы комплексного оценивания	Механизмы экономической ответственности	Механизмы стимулирования снижения уровня риска	Механизмы перераспределения риска	Механизмы резервирования	Механизмы формирования и использования централизованных фондов	Механизмы управления региональными программами
Механизмы Механизмы комплексного оценивания интегрального риска и ущерба (1.2, 1.3)	+	•	•	•	•	•	•
Механизмы штрафов (2.1)		+	•				•
Механизмы платы за риск (2.2, 3.2, 4.2)		+	•				•
Механизмы финансирования снижения уровня риска (2.3, 3.3, 4.3, 4.4)			+	•		+	•
Механизмы компенсации затрат на снижение уровня риска (2.4, 3.4, 4.5)			+	•			•
Механизмы продажи квот на уровень риска (3.5, 4.6)			•	+		•	•
Механизмы страхования (2.5, 3.6)				+	•		•
Механизмы аудита (2.6)	+					•	•
Механизмы снижения ожидаемого ущерба (2.7)			+				•
Механизмы экономической мотивации (3.7)			+	•		+	•
Механизмы оптимизации региональных программ (1.3, 3.1)			•	•		•	+
Механизмы согласования интересов органов управления (3.8)			+			•	+

В отличие от предыдущих классов механизмов, направленных в основном на повышение уровня безопасности или снижение риска, механизмы резервирования направлены на создание условий для скорейшей ликвидации чрезвычайной ситуации и уменьшения потерь от нее. К механизмам резервирования можно условно отнести рассматриваемые в настоящей работе *механизмы страхования* (разделы 2.5 и 3.6).

Механизмы формирования и использования централизованных фондов. Здесь зачастую на первый план выходит проблема не формирования фонда, а его эффективного распределения [17, 92, 132].

К механизмам формирования и использования централизованных фондов относятся рассматриваемые в настоящей работе *механизмы финансирования снижения уровня риска* (разделы 2.3, 3.3, 4.3 и 4.4) и *механизмы экономической мотивации* (раздел 3.7).

И, наконец, при разработке **механизмов управления региональными программами** могут использоваться все механизмы, в первую очередь – *механизмы оптимизации региональных программ* снижения уровня риска (разделы 1.3 и 3.1) и *механизмы согласования интересов органов управления* (раздел 3.8) – см. Табл. 1.

В качестве отступления отметим, что в [135, 145, 146] выделены три метода управления ЭкЭС:

– принуждение (то есть, установление ограничений, сильных штрафов и т.п. – *институциональное управление* в соответствии с терминологией работы [98]),

– побуждение (*мотивационное управление* в соответствии с терминологией работы [98]);

– убеждение (воздействие, приводящее в условиях возможности перераспределения выигрышей к выгоды кооперативного поведения, выбору участниками ЭкЭС оптимальных по Парето действий, совпадению их интересов и т.д.).

Рассматриваемые в настоящей работе различные механизмы с той или иной степенью используют все три перечисленных метода.

Структура изложения. В первой главе обсуждаются общие проблемы управления уровнем риска в ЭкЭС, приводятся структура возможного ущерба от чрезвычайных ситуаций и краткий обзор методов оценки уровня риска. Значительное внимание уделяется механизмам комплексного оценивания интегрального риска и ущерба и механизмам оптимизации программ снижения уровня риска.

Во второй главе описаны механизмы управления (см. Табл. 1) на уровне предприятия, в третьей главе – на уровне региона.

В четвертой главе приводятся имитационные модели (результаты проведения деловых и имитационных игр) некоторых механизмов.

Заключение содержит краткое обсуждение перспектив дальнейших исследований.

В приложения вынесены определения базовых используемых терминов, а также основные определения и сокращения.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность за ценные замечания и пожелания по содержанию настоящей работы: академику РАН С.Н. Васильеву, члену-корреспонденту РАН Н.А. Махутову, д.т.н. В.В. Кульбе, д.т.н. Т.И. Овчинниковой, д.ф.-м.н. Г.А. Угольницкому, к.т.н. М.В. Губко.

ГЛАВА 1. УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ РИСКА В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящей главе рассматриваются общие проблемы управления уровнем риска в эколого-экономических системах: в разделе 1.1 описываются природные и техногенные риски и приводится структура возможного ущерба от чрезвычайных ситуаций; в разделе 1.2 приводится краткий обзор методов оценки уровня риска; раздел 1.3 посвящен механизмам оптимизации программ снижения интегрального уровня риска.

1.1. ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ

В арабском языке «*риск*» означает что-либо случайное, что дается богом и что может принести пользу (прибыль). Латинское слово *risicum* первоначально относилось к испытанию, которому подвергается моряк, преодолевая рифы [179]. Но во всех этих случаях риск, так или иначе, связан со случайными событиями и неопределенными последствиями [121]. В средние века, благодаря развитию азартных игр, особенно игр в кости, стали возникать задачи оценки шансов будущих состояний, что привело к появлению *теории вероятности* – современной научной базы количественной оценки рисков. Начало XX века стало периодом активного развития научных основ изучения риска. Впервые разделение понятий «риск» и «неопределен-

ность» было сделано американским экономистом Ф. Найтом, который специально подчеркивал принципиальную измеримость риска, в отличие от неизмеримой *неопределенности*, в частности, в отношении будущих событий [169].

Проявление риска в различных сферах деятельности человека повлекло за собой многочисленные его определения и трактовки. Например, в [121] приведены такие из них, как:

- шанс или вероятность потерь;
- отклонение фактических результатов от ожидаемых;
- вероятность любого исхода, отличного от ожидаемого;
- вероятность нежелательного исхода.

Значительная часть определений риска связана с двумя утверждениями: риск связан со случайными событиями или процессами; последствия этих событий или процессов являются нежелательными или неприемлемыми. Вместе с тем, для полноты картины необходимо помнить, что проявление риска в общем случае может иметь как негативные, так и позитивные последствия, иначе невозможно понять, почему люди берут на себя, принимают риск. Поведение, связанное с принятием риска (*risk-bearing*), представляет собой балансирование между случайными потерями и случайными вознаграждениями.

Риск как вероятный экономический ущерб стали рассчитывать торговцы и ростовщики, видимо, уже в Древнем Вавилоне, что видно из содержания «Законов Хаммурапи», записанных в XVIII веке до н.э. Разработка основ теории риска как основы страхования была начата в работах австрийского математика Э. Лундберга [163]. Достаточно широкая и одновременно конструктивная трактовка риска стала использоваться в *страховании*, поскольку данная область предпринимательской деятельности непосредственно связана с существованием и различными формами проявления риска. Именно через страхование риск стал товаром, который имеет стоимостные оценки.

В индустриальную эпоху ускорились и получили глобальное распространение основные факторы, вызывающие рост природного и иного риска [143, 153]. Это:

- факторы, повышающие подверженность населения и хозяйства опасным природным воздействиям:
 - освоение земель с неблагоприятными природными условиями, связанное с ростом народонаселения;

- переориентация производства на новые источники минеральных ресурсов;
- техногенная активизация природных опасностей и увеличение их разнообразия на освоенных территориях;
- факторы, повышающие уязвимость населения и экономики к опасным природным воздействиям:
 - утяжеление и усложнение зданий, сооружений, коммуникаций, транспортных средств и т. п.;
 - урбанизация и централизация снабжения городов энергией, теплом, водой, усиливающая их зависимость от устойчивости работы этих важных объектов хозяйства;
- факторы, снижающие защищенность населения и хозяйства от опасных природных воздействий:
 - обострение военного соперничества, а также социальной, экономической, экологической напряженности во многих странах, что вынуждает органы власти сосредоточиваться на решении лишь наиболее острых проблем;
 - ужесточение рыночной конкуренции, требующее снижения непроизводительных расходов;
 - либерализация мирового рынка, влияющая на права государств контролировать безопасность производства.

Все эти факторы привели к тому, что во второй половине XX века впервые в истории скорость роста экономического ущерба и числа людей, страдающих от стихийных бедствий и техногенных катастроф, в мире стала сравнима со скоростью роста производства и населения. В то же время, ранее аналогичные потери удерживались на относительно низком уровне посредством известных предупредительных и оперативных мер. Важно также, что в настоящее время одновременно и столь же быстро увеличивается ущерб от техногенных катастроф. При этом многие из них имеют комбинированный природно-техногенный характер. Самостоятельное значение получил экологический риск, техногенный по источнику и создаваемый не столько аварийными, сколько повседневными воздействиями производства на природную среду.

В ответ на все эти события возникла концепция *управления риском* (см. ссылки выше), то есть удержания его на уровне, считающегося допустимым (приемлемым) по тем или иным соображениям. Данная концепция является сейчас стержнем работ, проводимых многими странами, по уменьшению опасности стихийных бедствий и техногенных катастроф, и напрямую связана с идеей устойчивого

развития (как отмечалось выше, под устойчивым развитием понимается управляемое развитие общества, не разрушающего своей природной основы и обеспечивающее непрерывный прогресс цивилизации [144]).

Целью управления риском является обеспечение максимально возможной при заданных условиях степени защищенности или устойчивости социальных, экономических, экологических и других систем от опасных природных и техногенных воздействий. Основной категорией, характеризующей эту цель, является *безопасность*. Толковые словари русского языка В.И. Даля и С.И. Ожегова трактуют безопасность практически одинаково: как состояние отсутствия опасности, угрозы или вреда (ущерба) и как синоним сохранности (защищенности), надежности объекта. Сходная трактовка дается и в толковом словаре английского языка, где понятие «безопасность» передается двумя терминами «safety» и «security» и подразумевает надежность, защищенность, а также некие гарантии для данного объекта от каких-либо посягательств (нападений, шпионажа, вмешательств и т. п.).

Именно такая интерпретация термина «безопасность» положена в основу его научной и (что особенно важно) нормативно-правовой трактовки, которая, в отличие от категории «риск», законодательно закреплена в Законе Российской Федерации «О безопасности», принятом в 1992 г. [147]. Согласно этому закону, безопасность определяется как состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства. При этом указанные интересы определяются как совокупность потребностей, удовлетворение которых надежно обеспечивает существование и возможность прогрессивного развития. Такое понимание безопасности закреплено также в Федеральных законах России «О защите населения и территорий при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера» (1994 г.), «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (1997 г.), и во многих других официальных документах.

При рассмотрении социальных, экономических и экологических аспектов крупной аварии или катастрофы обычно оперируют понятиями прямого, косвенного и полного *ущербов* [32]. Структура *полного ущерба* представлена на Рис. 8.

Под *прямым ущербом* в результате *чрезвычайной ситуации* (ЧС) будем понимать потери и убытки всех структур национальной экономики, попавших в зоны воздействия ЧС, и складывающиеся из

невозвратных потерь основных фондов, оцененных природных ресурсов и убытков, вызванных этими потерями, а также затрат, связанных с ограничением развития и ликвидацией ЧС.

Определение величины прямого ущерба, связанного с потерей основных фондов промышленного производства, в принципе, не должно вызывать затруднений. Сложность представляет оценка природных ресурсов, выбывших из хозяйственного оборота в результате воздействия ЧС, особенно земли, являющейся базисом производства сельскохозяйственной продукции. Однако специалистами уже предпринимаются попытки нахождения сравнительно реалистической оценки, например, земельных ресурсов, что в значительной степени облегчает поставленную задачу.

Косвенным ущербом от аварии называют потери, убытки и дополнительные затраты, которые понесут объекты народного хозяйства, не попавшие в зону прямого воздействия, и вызванные, в первую очередь, нарушениями и изменениями в сложившейся структуре хозяйственных связей, инфраструктуре.

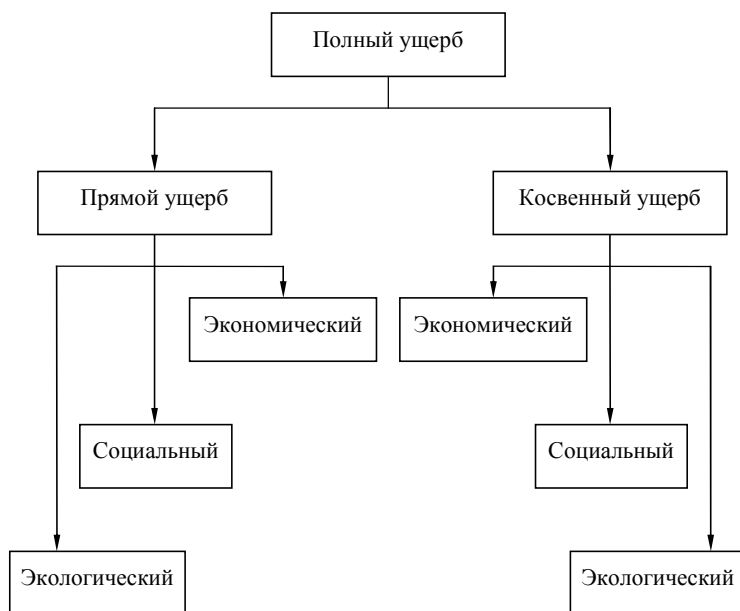


Рис. 8. Структура полного ущерба

К косвенному ущербу можно отнести и плохо поддающиеся стоимостной оценке отрицательные социальные эффекты, например, падение производительности труда оставшихся в зоне ЧС работников, вызванное их угнетенным психическим состоянием. Прямой и косвенный ущерб в совокупности образуют полный ущерб.

Все виды прямых *потерь*, которые несет национальная экономика и население страны в результате ЧС, можно разделить на три основные группы (см. Рис. 8):

- экономические;
- социальные (гибель людей, потеря здоровья, ухудшение условий жизни);
- экологические.

Прямой экономический ущерб (Рис. 9) связан непосредственно с повреждением или утратой основных и оборотных фондов, а также включает затраты на ограничение развития ЧС. Этот вид ущерба, как правило, стараются представить с максимально возможной точностью в денежном выражении.

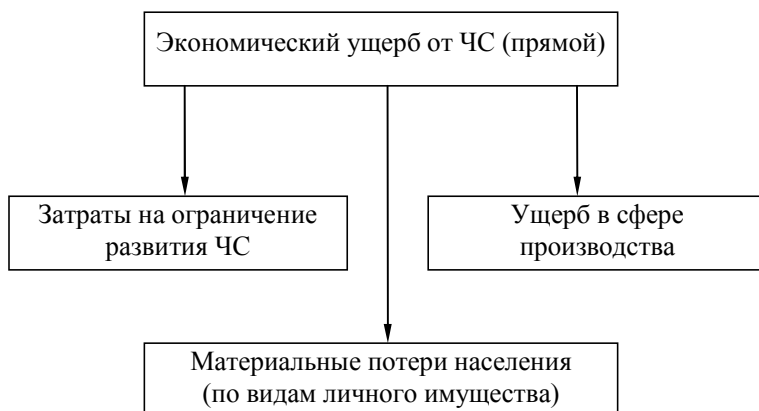


Рис. 9. Структура прямого экономического ущерба

Затраты на ограничение развития ЧС (или затраты на ликвидацию ЧС, но не на восстановление) – это те виды затрат, которые необходимы для ограничения распространения ЧС и уменьшения ее последствий (затраты на эвакуацию населения – организация переселения, оплата транспорта, организация расселения на новых местах и т.д.).

Материальные потери населения – вид потерь, связанный с утратой личного имущества граждан (жилья, транспорта и т.д.).

Прямой экономический ущерб в производственной сфере связан непосредственно с выбытием и утратой основных и оборотных фондов (земля, здания и сооружения, линии электропередач, трубопроводы, телефонная и телеграфная связь, линии водоснабжения, машины и оборудование, транспортные средства, инструменты и инвентарь, многолетние насаждения, незавершенное производство, готовая продукция, товары).

Прямой социальный ущерб от ЧС непосредственно связан с воздействием на население и его среду обитания (Рис. 10).

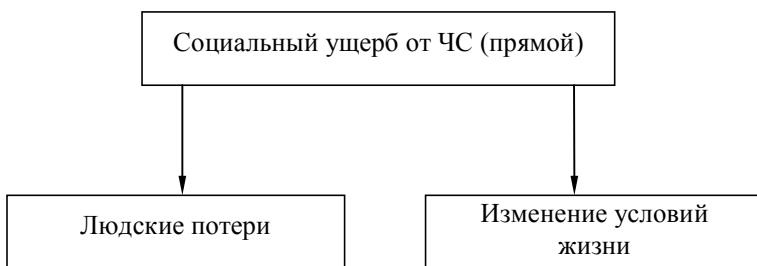


Рис. 10. Структура прямого социального ущерба

Прямой экологический ущерб от ЧС связан с ущербом природной среде (Рис. 11).

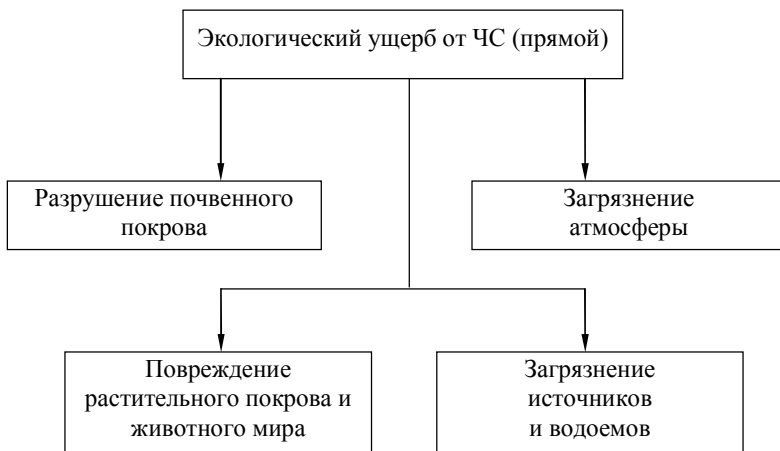


Рис. 11. Структура прямого экологического ущерба

Прямой экологический ущерб от ЧС это:

- ущерб от уничтожения или разрушения почвенного покрова;
- ущерб от уничтожения либо повреждения растительного и животного мира;
- ущерб от загрязнения водных источников и водоемов, их исчезновение или нежелательное появление;
- ущерб от загрязнения атмосферы.

Аналогичным образом можно представить структуру косвенного ущерба.

Определив, что в общем случае понимается под риском и безопасностью, а также описав виды и структуру ущерба, перейдем к краткому описанию методов оценки уровня риска.

1.2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УРОВНЯ РИСКА

Для того чтобы управлять уровнем риска, необходимо, прежде всего, уметь его измерять. В руководстве по оценке экологического риска, подготовленным агентством по охране окружающей среды США (EPA), под экологическим риском понимается вероятность реализации неблагоприятных экологических последствий в результате воздействия одного или нескольких факторов химической, физической или биологической природы, которые могут вызвать неблагоприятную реакцию окружающей среды [166]. В России, в соответствии с [151], **экологический риск** – это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера. И, соответственно, **экологическая безопасность** – это состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий.

Уровень безопасности производства во многом связан с технологией производства, выполнением правил техники безопасности, наличием средств, позволяющих эти правила реализовывать. Оценка уровня безопасности производства осуществляется, как правило, экспертным путем. Для этого проводятся всевозможные инспекторские проверки, осуществляется контроль за соблюдением технологических требований и т.д. Подобного рода мероприятия позволяют

сформировать экспертную оценку вероятности возникновения ЧС, связанной с производственной деятельностью, например, в регионе.

Таким образом, оценить уровень риска – это значит определить вероятность возникновения угроз безопасности системе и отдельным ее компонентам, а также оценить возможный ущерб.

Оценка риска и/или размера ожидаемого ущерба главным образом определяется существующей в обществе системе ценностей. Отражением этой системы в виде некоторых процедур, позволяющих представить размеры возможных потерь, служат различные методики определения риска.

Естественно, что результаты такой оценки будут тем достовернее, чем проще исследуемый объект и надежнее исходные данные об источниках его потенциальной опасности.

При определении источников опасности обычно пользуются некоторыми критическими параметрами, характеризующими объемы накопленных вредных веществ и запасов энергии. В качестве критерия критичности используются часто размеры вероятных зон поражения, образующиеся в результате аварийных выбросов вещества и энергии.

Например, согласно методике анализа гидроэкологического риска WERF (Фонд экологического исследования воды, США) [121, 166], простая оценка риска (ступень 1) заключается в нахождении так называемого индекса опасности (quotient index или hazard quotient), определяемого как отношение между наблюдаемым и допустимым фоновым уровнем токсичных веществ в воде. Химические вещества, для которых этот индекс превышает предельное значение, подвергаются более сложной процедуре риск-анализа второй ступени с целью выработки мероприятий по уменьшению риска. Сравнение ожидаемой или измеренной величины воздействия с величиной воздействия, приводящей к нежелательным экологическим событиям, позволяет определить величину предварительного (оценочного) индекса опасности.

По мнению [121], метод расчета индекса опасности представляется полезным для предварительной оценки экологического риска. Однако следует иметь в виду, что значения этого индекса не ограничены интервалом $[0; 1]$, а могут принимать сколь угодно большие значения и, следовательно, индекс опасности не может являться вероятностной мерой риска. Кроме того, до сих пор не разработаны переходные зависимости, позволяющие строго интерпретировать

значения этого индекса как количественные показатели возможных потерь.

Более перспективный и обоснованный подход к оценке экологического риска для здоровья населения, широко используемый в настоящее время во многих странах мира, в том числе и в России, рекомендует Американская национальная академия наук [1, 33, 170]. Процедура оценки такого риска включает четыре стадии:

1. Идентификация опасности;
2. Оценка воздействующих доз канцерогенных и неканцерогенных веществ;
3. Оценка зависимости доза-эффект (чувствительности к воздействию);
4. Характеристика риска в виде индивидуальных (для одного человека из оцениваемой группы) и полных (для всей группы) значений летальных исходов и других количественных показателей возможных негативных для населения исходов.

В [122] дается описание методов:

- оценки экономического риска от процесса подтопления строительного объекта;
- оценки экономического риска оценки экономического риска от карстово-суффозионных провалов земной поверхности;
- оценки индивидуального, социального и экономического риска от селей;
- оценки оползневого и интегрального риска.

Как уже упоминалось выше, наряду с оценкой риска часто целесообразно иметь информацию о возможном ущербе от чрезвычайной ситуации. Существуют пять Федеральных законов, с учётом которых должна проводиться оценка ущерба от аварий и катастроф:

- Федеральный закон от 29 июля 1998 г. № 135-ФЗ «Об оценочной деятельности в Российской Федерации» (с изменениями от 21 декабря 2001 г., 21 марта, 14 ноября 2002 г., 10 января, 27 февраля 2003 г., 22 августа 2004 г., 5 января, 27 июля 2006 г., 5 февраля, 13, 24 июля 2007 г.);
- Федеральный закон от 22 августа 1995 г. № 151-ФЗ «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей»;
- Федеральный закон от 21 июня 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями от 18 декабря 2006 года);

- Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;

Также приняты несколько Постановлений Правительства РФ, относящихся к проблеме расследования и оценки ущерба от аварий и катастроф:

- Постановление Правительства РФ от 13.09.1996 г. № 1094 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;

- Постановление Правительства РФ от 6 июля 2001 г. № 519 «Стандарты оценки, обязательные к применению субъектами оценочной деятельности»;

- Постановление Правительства РФ от 7 июня 2002 г. № 395 «О лицензировании оценочной деятельности» (с изменениями от 3 октября 2002 г.);

- Постановление Правительства РФ от 11 марта 1999 г. № 279 «Положение о расследовании и учете несчастных случаев на производстве» (с изменениями от 28 января, 24 мая 2000 г.);

- Постановление Правительства РФ от 10 марта 1999 г. № 263 «Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте» (с изменениями от 1 февраля 2005 г.).

Таким образом, на сегодняшний день существует множество подходов к оценке уровня риска. Осуществление этой оценки (особенно количественной) является сложной комплексной задачей (см., например, обзоры в [121, 143]). Тем не менее, методы оценки риска не являются основным предметом настоящей работы, поэтому ниже при рассмотрении механизмов управления считается, что риски (то есть, и вероятности, и ущербы) известны.

1.3. МЕХАНИЗМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА

Для управления уровнем риска необходимо уметь осуществлять оценку локальных рисков, переходить от набора локальных оценок рисков (ущербов) к интегральной (комплексной) оценке риска (ущерба). Поэтому в настоящем разделе сначала приводится общее описание задач комплексного оценивания, затем рассматривается методика интегральной оценки риска и ущерба. Все это позволяет

сформулировать и решить задачу построения оптимальной программы (комплекса мероприятий) снижения уровня риска.

Задачи комплексного оценивания, заключающиеся в переходе от детального к агрегированному описанию сложных систем, встречаются во многих областях хозяйственной деятельности. Например:

- оценка деятельности трудовых коллективов (выбор лучшего) [27];

- оценка приоритетных направлений развития науки и техники (иерархия приоритетов) [65];

- оценка привлекательности инвестиционных проектов (выбор наиболее эффективного) [7];

- оценка степени достижения целей при формировании согласованных программ развития региона [6, 7];

- оценка предложений по проектам законодательных и иных нормативных правовых актов [61].

Все эти задачи относятся к классу задач *комплексного оценивания* сложных социально-экономических объектов (проектов, программ, сценариев развития и др.). В последнее время для решения такого рода задач широко используется подход, основанный на формировании дерева оценок и вычислении на нем *интегральной оценки риска* (ИОР) или *комплексной оценки* (КО).

Решение таких задач основано на методологии формирования интегральной оценки риска путем реализации стандартных формальных и экспертных процедур. В Институте проблем управления РАН разработана методология комплексного оценивания, которая обобщила подходы к построению комплексной оценки, встречающиеся во многих областях хозяйственной деятельности. Суть этой методологии состоит в следующем:

- на первом этапе для оцениваемого сценария развития устанавливается набор локальных рисков (критериев – в зависимости от содержательной задачи), которые характеризуют возможное развитие события с различных точек зрения;

- на втором этапе весь набор локальных рисков разбивается на две подгруппы:

- первая подгруппа – локальные риски, по которым показатели, используемые для оценки развития события, могут быть точно рассчитаны (например, экономический риск);

- вторая подгруппа – локальные риски, по которым показатели рассчитать невозможно, а развитие события с этими локаль-

ными рисками оценивается только экспертным путем (например, состояние уровня жизни);

- на третьем этапе формируется балльная шкала оценок, с помощью которой эксперты оценивают локальные риски второй подгруппы;

- на четвертом этапе определяются оценки локальных рисков, входящих во вторую подгруппу;

- на пятом этапе формируется набор показателей, которые характеризуют локальные риски первой подгруппы;

- на шестом этапе для каждого показателя локальных рисков из первой подгруппы формируются шкалы пересчета их значений в промежуточные балльные оценки;

- на седьмом этапе рассчитываются значения показателей локальных рисков из первой подгруппы;

- на восьмом этапе на основе сформированной шкалы пересчитываются значения показателей в промежуточные балльные оценки риска;

- на девятом этапе определяются оценки локальных рисков, входящих в первую подгруппу;

- на десятом этапе определяются пары локальных рисков, оценки которых будут сворачиваться в обобщенную оценку, и строится бинарное дерево свертки;

- на одиннадцатом этапе для построенного бинарного дерева формируются соответствующие матрицы логической свертки;

- на двенадцатом этапе определяется интегральная оценка риска;

Отметим, что, если для всех выбранных локальных рисков оценки уровня риска определяются с помощью экспертов, то количество этапов, необходимых для получения интегральной оценки, сокращается больше чем на половину. В этом случае чтобы получить интегральную оценку уровня риска, достаточно реализовать только шесть этапов, а именно: первый, третий, четвертый, десятый, одиннадцатый и двенадцатый.

Подробное описание методологии построения интегральной оценки риска, социально-экономических последствий чрезвычайных событий и примеры использования процедур комплексного оценивания приводятся в [6-8, 14, 49, 55, 60, 61, 68].

Интегральная оценка риска. Рассмотрим содержание каждого этапа более подробно.

Первый этап – установлено n локальных рисков для оценивания интегрального уровня риска.

Второй этап – все риски разбиваются на две подгруппы. Это разбиение происходит лишь в том случае, если существуют локальные риски, оценка по которым может быть определена на основе объективных данных, то есть существуют показатели, которые могут быть просто рассчитаны, измерены или получены с помощью конкретных формальных процедур. В то же время, оценка уровня остальных рисков будет осуществлена только экспертным путем. В дальнейшем будем считать, что все выбранные локальные риски упорядочены таким образом, что по первым n' из них показатели могут быть точно рассчитаны.

Третий этап – формирование балльной шкалы оценок. Для всех локальных рисков формируется единая шкала. Если шкала оценок является m -балльной, где $m = 2, 3, 4, \dots$, то, соответственно, максимальная оценка, которую можно присвоить локальному уровню риска, будет m баллов, а минимальная оценка – один балл.

Четвертый этап – определение оценок локальных рисков, входящих во вторую подгруппу. Если i -й локальный риск оценивают n_i экспертов, $i = n' + 1, n' + 2, \dots, n$, то оценки уровня риска могут быть получены путем применения стандартных процедур свертки экспертных оценок. Например, если s_{ij} – экспертная оценка по i -му локальному риску, полученная от j -го эксперта, то оценка O_i по этому локальному риску может быть сформирована, например, на основе процедуры усреднения: $O_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} s_{ij}$ или нахождения медианы.

Пятый этап – определяется множество показателей, которые характеризуют локальные риски, входящие в первую подгруппу, то есть определяется количество Q_i , $i = \overline{1, n'}$, показателей, характеризующих i -ый локальный риск.

Шестой этап – разработка шкал пересчета значений показателей в локальные балльные оценки. Для первых n' локальных рисков, то есть локальных рисков, по которым оценку определяют показатели, имеющие характер объективных данных, формируются $\sum_{i=1}^{n'} Q_i$ отдельных шкал. Эти шкалы строятся следующим образом. Для j -го

показателя, $j = 1, \dots, Q_i$, i -го локального риска, $i = \overline{1, n'}$, экспертно или на основании расчетов определяются наилучшее Π_{ij}^n и наихудшее Π_{ij}^x значения показателя. Затем эти значения откладываются на числовой оси. Таким образом, полученный отрезок включает в себя все возможные значения, которые может принимать этот показатель. После этого отрезок разбивается на m отрезков, причем границы этих отрезков также определяются экспертно. Достаточно часто встречающийся способ разбиения – это разбиение на равные отрезки (альтернативой является разбиение на равно представительные отрезки, в пределы каждого из которых попадает примерно одинаковое количество потенциально оцениваемых ситуаций).

Если $\Pi_{ij}^n > \Pi_{ij}^x$, то полученная шкала имеет вид, представленный на Рис. 12.

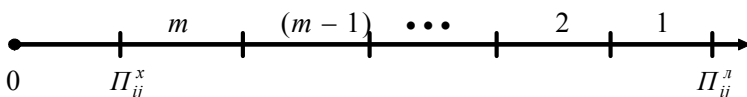


Рис. 12. Шкала пересчета значений показателей в локальные балльные оценки для случая $\Pi_{ij}^n > \Pi_{ij}^x$

Если же $\Pi_{ij}^n < \Pi_{ij}^x$, то шкала имеет вид, представленный на Рис. 13.

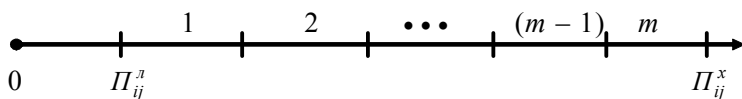


Рис. 13. Шкала пересчета значений показателей в локальные балльные оценки для случая $\Pi_{ij}^n < \Pi_{ij}^x$

Седьмой этап – измеряются или рассчитываются значения показателей b_{ij} , которые характеризуют локальные риски первой подгруппы.

Восьмой этап – значения показателей, полученные на седьмом этапе, пересчитываются в промежуточные балльные оценки. Для этого на соответствующей шкале находится значение того или иного показателя, и определяется балльная оценка, которой это значение соответствует.

Девятый этап – определяются оценки уровня риска из первой подгруппы: $O_i = \frac{1}{Q_i} \sum_{j=1}^{Q_i} b_{ij}$.

Десятый этап – определяются пары показателей, по которым оценки уровня риска будут сворачиваться в обобщенную оценку. На данном этапе эти пары показателей также определяются экспертами, то есть эксперты формируют так называемую *бинарную структуру свертки* [18, 42], которая наглядно иллюстрирует схему последовательного получения сначала обобщенных оценок, а затем и комплексной оценки – интегральной оценки риска (ИОР). Простейшая бинарная структура строится для двух локальных рисков. Естественно, что эта структура единственная, и для двух локальных рисков существует только один вариант свертки оценок. Поэтому, если для построения интегральной оценки уровня риска выделено только два локальных риска, то привлечение экспертов для формирования бинарной структуры не требуется. Простейшая бинарная структура изображена на Рис. 14.

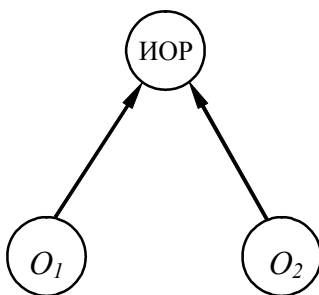


Рис. 14. Простейшая бинарная структура

Для трех локальных рисков, как и для двух, бинарная структура также может быть построена только одним способом. Эта структура представлена на Рис. 15.

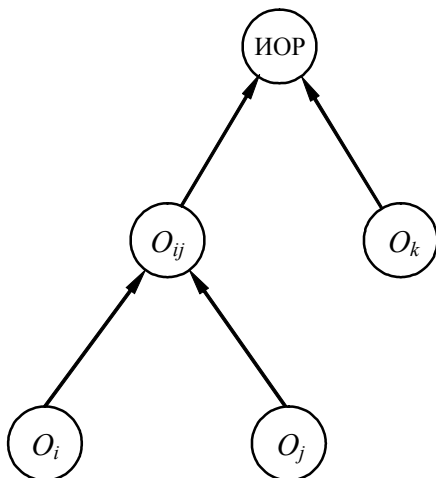


Рис. 15. Бинарная структура для трех локальных рисков

Однако для этой единственной структуры уже возможно построить три варианта свертки. Все возможные варианты получения обобщенной (O_{ij}) и интегральной (ИОР) оценок для трех локальных рисков представлены в Табл. 2.

Табл. 2. Варианты получения обобщенной и интегральной оценок для трех локальных рисков

№ варианта	i	j	k
1	1	2	3
2	1	3	2
3	2	3	1

Четыре локальных риска уже позволяют построить две бинарные структуры свертки. Первая структура основана на параллельном сворачивании оценок уровня риска (*параллельная структура*). При этом сначала из двух пар оценок строятся две обобщенные оценки, а затем уже из полученных обобщенных оценок формируется интегральная оценка риска. Параллельная бинарная структура для четырех локальных рисков изображена на Рис. 16.

Видно, что на первом уровне иерархии находятся локальные оценки, на втором – обобщенные оценки, и, наконец, ИОР формируется на третьем уровне иерархии.

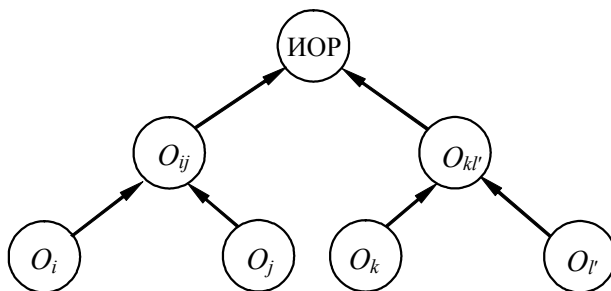


Рис. 16. Параллельная бинарная структура для четырех локальных рисков

Для параллельной бинарной структуры можно построить три варианта свертки локальных оценок, которые показаны в Табл. 3.

Табл. 3. Варианты свертки локальных оценок для параллельной бинарной структуры

№ варианта	i	j	k	l'
1	1	2	3	4
2	1	3	4	2
3	1	4	2	3

Таким образом, если для определения ИОР выбрана параллельная бинарная структура, то задача экспертов заключается в выборе одного варианта свертки из трех возможных.

Второй способ построения бинарной структуры для четырех локальных рисков – это последовательное агрегирование оценок риска (*последовательная структура*). При этом на первом уровне находятся только две оценки, на втором уровне иерархии находится одна обобщенная оценка риска, построенная на основе свертки двух оценок риска первого уровня, и одна оценка локального риска. Обобщенная оценка третьего уровня получается путем свертки обобщенной оценки второго уровня и третьей оценки локального риска. И, наконец, на следующем уровне, агрегируя обобщенную оценку третьего уровня и четвертую оценку локального риска, получаем ИОР. Последовательная бинарная структура для четырех локальных рисков изображена на Рис. 17.

Из Рис. 17 видно, что при использовании последовательной бинарной структуры, интегральная оценка уровня риска занимает четвертый уровень иерархии, что вполне естественно, так как параллельное выполнение операций агрегирования всегда сокращает количество уровней иерархии.

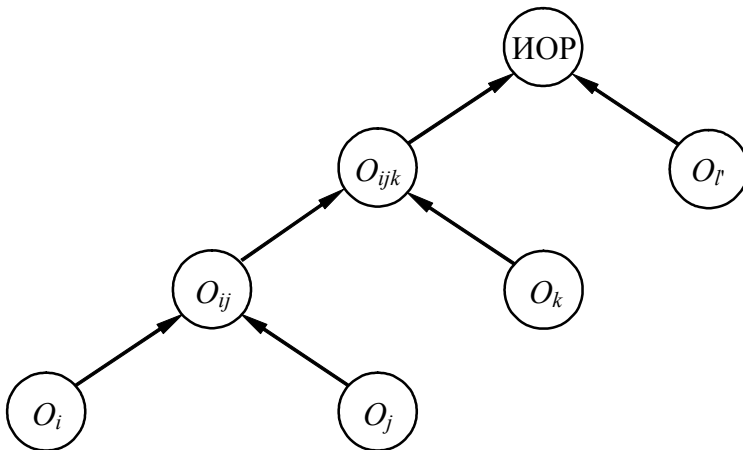


Рис. 17. Последовательная бинарная структура для четырех локальных рисков

Как было показано выше, для параллельной бинарной структуры и четырех локальных рисков возможно сформировать лишь три варианта построения ИОР, в то время как для последовательной бинарной структуры уже может быть построено двенадцать вариантов свертки. Все возможные варианты формирования ИОР при выборе четырех локальных рисков и использовании последовательной бинарной структуры представлены в Табл. 4.

Задача экспертов для этой структуры становится более сложной, так как им необходимо осуществить выбор одного варианта из двенадцати.

Таким образом, при выборе четырех локальных рисков эксперты сначала должны выбрать бинарную структуру свертки, а затем определить вариант построения ИОР. Примеры содержательных правил построения структуры можно найти в [49].

Также следует отметить, что, если для оценки уровня риска на первом этапе сформировано более четырех локальных рисков, то для

определения ИОР, кроме параллельных и последовательных бинарных структур, можно сформировать и *смешанные структуры*. Причем, нетрудно заметить, что для нечетного числа локальных рисков, можно сформировать или последовательную или смешанную бинарные структуры, в то время как параллельную бинарную структуру построить невозможно.

Табл. 4. Варианты свертки локальных оценок для последовательной бинарной структуры

№ варианта	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
1	1	2	3	4
2	1	2	4	3
3	1	3	2	4
4	1	3	4	2
5	1	4	2	3
6	1	4	3	2
7	2	3	1	4
8	2	3	4	1
9	2	4	1	3
10	2	4	3	1
11	3	4	1	2
12	3	4	2	1

Одиннадцатый этап – формирование матриц свертки. Как видно из Рис. 14 – Рис. 17 для получения ИОР оценки локальных рисков и обобщенные оценки попарно «сравниваются» друг с другом, и формируются обобщенные оценки более высокого уровня иерархии. Формирование обобщенных оценок осуществляется при помощи матриц свертки. *Матрица свертки* – это таблица, номер строки которой соответствует оценке одного локального риска, а номер столбца – оценке другого локального риска. Отсчет строк и столбцов матрицы обычно ведется от ее нижнего левого угла. На пересечении этих строки и столбца как раз и находится обобщенная оценка. При параллельной бинарной структуре полученные обобщенные оценки на нижнем уровне опять попарно сравниваются друг с другом, и формируется обобщенная оценка следующего уровня при помощи матриц свертки уже следующего уровня. При последовательной бинарной структуре каждая полученная обобщенная оценка на нижнем уровне сравнивается с соответствующей оценкой локального

риска, и формируется обобщенная оценка следующего уровня. Процедура повторяется до тех пор, пока не останется одна обобщенная оценка, которая и представляет собой ИОР.

Отметим, что для каждой пары сворачиваемых оценок выбирается своя матрица свертки. Для m -балльной шкалы матрицы имеют размерность $m \times m$. Для $m = 2$ можно выделить три базовые матрицы свертки – см. Рис. 18.

$$M_1 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad M_2 = \begin{array}{|c|c|} \hline 2 & 2 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad M_3 = \begin{array}{|c|c|} \hline 2 & 2 \\ \hline 1 & 2 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 18. Матрицы свертки для двухбалльной шкалы

Для трехбалльной шкалы примеры базовых матриц свертки представлены на Рис. 19.

$$M_1 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline \end{array} \quad M_2 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2 & 2 \\ \hline \end{array} \quad M_3 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$M_4 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 2 \\ \hline \end{array} \quad M_5 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad M_6 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 2 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 19. Матрицы свертки для трехбалльной шкалы

Основное внимание при формировании матриц свертки должно быть уделено их *непротиворечивости*, то есть значение каждого элемента матрицы не должно противоречить логике ее построения.

Если обозначить через A_{ij} элементы матрицы свертки, то матрица будет непротиворечивой, если выполняются следующие условия (считается, что нумерация столбцов и строк матриц свертки ведется от нижнего левого угла):

1. $A_{ii} = i$;
2. $\min(i, j) \leq A_{ij} \leq \max(i, j)$;
3. $A_{ij} \leq A_{i+1j}$;
4. $A_{ij} \leq A_{i+1j}$.

Двенадцатый этап – определение ИОР. Проиллюстрируем этот этап следующим примером. Пусть выделено четыре локальных риска и выбрана трехбалльная шкала. По всем локальным рискам получены следующие оценки: $O_1 = 1$, $O_2 = 2$, $O_3 = 2$, $O_4 = 1$, используется бинарная структура, которая изображена на Рис. 16, и выбран вариант № 1. Оценки O_1 и O_2 сворачиваются при помощи матрицы M_2 , оценки O_3 и O_4 – при помощи матрицы M_4 , а обобщенные оценки второго уровня сворачиваются матрицей M_6 , причем обобщенная оценка O_{12} имеет предпочтение над обобщенной оценкой O_{34} . Процедура расчета ИОР представлена на Рис. 20.

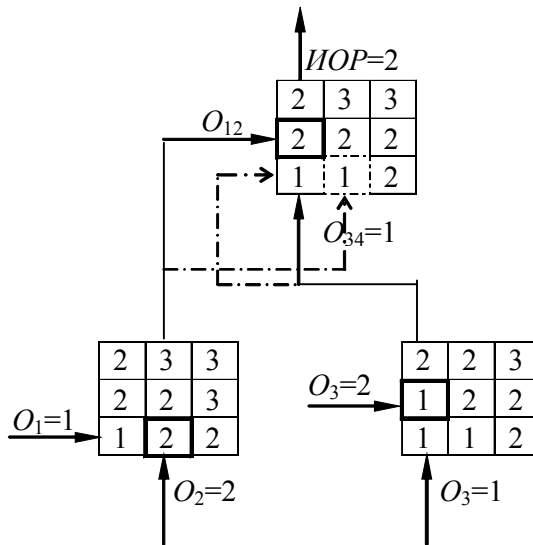


Рис. 20. Расчет ИОР для четырех локальных рисков

Если обобщенная оценка O_{34} имеет предпочтение над обобщенной оценкой O_{12} , то интегральная оценка риска равна 1. Для того чтобы реализовать требование предпочтения O_{34} над O_{12} и не менять структуры формирования интегральной оценки риска, необходимо вместо матрицы M_6 использовать транспонированную матрицу M_6^T . Другой способ формирования комплексной оценки для этого случая показан пунктирной линией на Рис. 20.

Заметим, что логические матрицы свертки определяют процедуру агрегирования локальных рисков в интегральную оценку риска, и

тем самым, фиксируют приоритеты и политику лиц, принимающих решения (ЛПР) по отношению к ущербам различного типа. Поэтому утверждение логических матриц свертки – ответственная процедура, выполняемая обычно на достаточно высоком уровне руководства.

Интегральная оценка ущерба. Предложенная методика построения ИОР на основе агрегирования локальных рисков (ожидаемых ущербов) может быть без существенных изменений применена и для построения ИОР как математического ожидания интегральной оценки ущерба. Для этого достаточно в качестве исходных показателей рассматривать не локальные риски, а непосредственно ущербы, приписывая каждой величине ущерба соответствующую вероятность. Таким образом, каждый тип ущерба характеризуется распределением вероятностей возможных значений ущерба. Задача заключается в определении на основе этих данных распределения вероятностей возможных значений интегральной оценки ущерба. Рассмотрим ее решение на примере дерева ущербов Рис. 21 с логическими матрицами свертки Рис. 22 (отметим, что в соответствующих матрицах свертки нумерация столбцов и строк ведется от верхнего правого угла¹⁰).

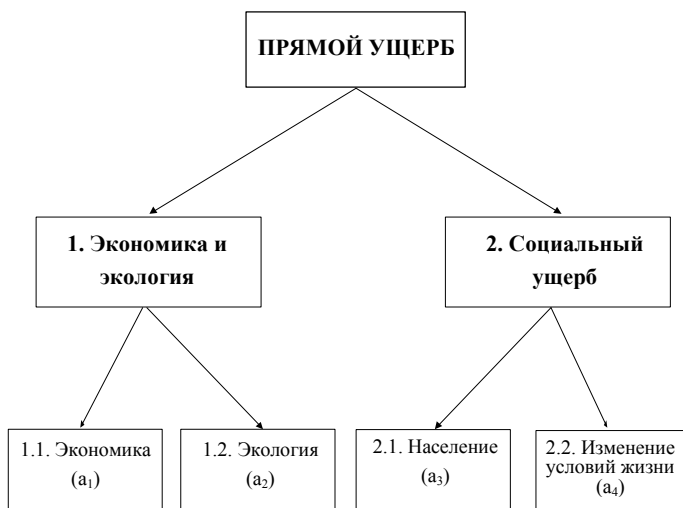


Рис. 21. Дерево свертки в примере интегральной оценки ущерба

¹⁰ Выбор «направления возрастания» элементов матриц свертки в каждом конкретном случае производится исходя из содержательных интерпретаций и удобства экспертов и ЛПР.

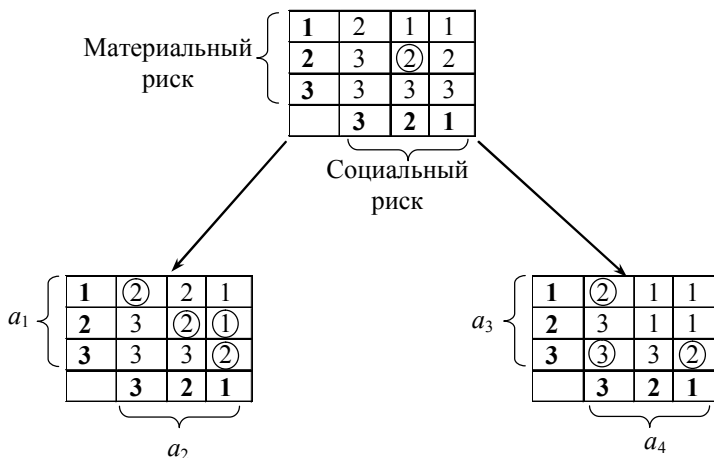


Рис. 22. Матрицы свертки в примере интегральной оценки ущерба

Обозначим p_{ij} вероятность значения j для ущерба i , $i = \overline{1,4}$, $j = \overline{1,3}$. Значения вероятностей p_{ij} приведены в Табл. 5.

Табл. 5. Вероятности различных значений ущерба

$i \backslash j$	1	2	3
1	0,3	0,3	0,4
2	0,3	0,3	0,4
3	0,4	0,3	0,3
4	0,4	0,3	0,3

Предположим, что ущербы различных типов являются независимыми случайными величинами. Определим распределение вероятностей возможных значений материального ущерба. Из анализа матриц на Рис. 22 видно, что незначительный материальный ущерб (оценка 1) имеет место в двух случаях. В первом случае незначительным является и экономический и экологический ущерб, а во втором – при незначительном экологическом ущербе имеет место ощутимый экономический ущерб. Обозначим W_{ij} – вероятность

оценки j материального ущерба. В соответствии с известными формулами теории вероятностей получаем:

$$W_{11} = p_{11}p_{21} + p_{12}p_{21} = 0,3 \times 0,3 + 0,3 \times 0,3 = 0,18.$$

Оценка 2 материального ущерба (ощутимый материальный ущерб) имеет место уже в четырех случаях. Поэтому

$$W_{12} = p_{11}p_{22} + p_{11}p_{23} + p_{12}p_{22} + p_{13}p_{21} = 0,3 \times 0,7 + 0,09 + 0,12 = 0,42.$$

Наконец оценка 3 (существенный материальный ущерб) имеет место в трех случаях: $W_{13} = p_{12}p_{23} + p_{13}p_{22} + p_{13}p_{23} = 0,4$.

Используя аналогичный подход, определяем распределение вероятностей W_{2j} возможных значений социального ущерба:

$$W_{21} = p_{31}p_{41} + p_{32}p_{41} + p_{31}p_{42} + p_{32}p_{42} = 0,49,$$

$$W_{22} = p_{31}p_{43} + p_{33}p_{41} = 0,24,$$

$$W_{23} = p_{32}p_{43} + p_{33}p_{42} + p_{33}p_{43} = 0,27.$$

Зная распределения вероятностей возможных значений материального и социального ущербов, на основе матрицы интегрального ущерба определяем распределение вероятностей возможных значений интегрального ущерба. Обозначая P_j – вероятность оценки j интегрального ущерба, получаем:

$$P_1 = W_{11}(W_{21} + W_{22}) = 0,13,$$

$$P_2 = W_{11}W_{23} + W_{12}W_{22} + W_{12}W_{21} = 0,35$$

$$P_3 = W_{12}W_{23} + W_{13}W_{23} + W_{13}W_{22} + W_{13}W_{21} = 0,51.$$

Теперь можно оценить интегральный риск R' как среднее значение интегральных оценок ущерба¹¹:

$$R' = 1 \times 0,13 + 2 \times 0,35 + 3 \times 0,51 = 2,36.$$

В данном случае уровень риска находится между ощутимым (средним) и существенным (высоким).

Предположение о независимости величин ущербов различных типов не всегда соответствует действительности. В ряде случаев, более адекватным является *сценарный подход*, при котором имеются несколько вариантов (сценариев) развития. Каждый вариант реализуется с некоторой вероятностью и характеризуется определенным вектором ущербов. Понятно, что в данном случае ущербы различных типов не являются независимыми случайными величинами. Пусть число возможных сценариев, реализующихся независимо, равно m' , а вероятность j -го варианта равна P_j . В этом случае, для каждого варианта j определяем интегральную оценку ущерба W_j . Зная интеграль-

¹¹ Следует подчеркнуть условность «взвешивания» балльных оценок.

ные оценки ущерба каждого варианта и его вероятность, можно определить и ожидаемый ущерб $W' = \sum_{j=1}^{m'} P_j W_j$.

Рассмотрим численный пример расчета риска на основе сценарного подхода. Пусть возможны три сценария развития техногенной катастрофы, различающиеся по тяжести последствий. Вероятности этих сценариев и соответствующие векторы ущербов приведены в Табл. 6.

Табл. 6. Вероятности сценариев и векторы ущербов

№ сценария	P_j	W_1	W_2	W_3	W_4	W'
1	0,2	1	2	1	2	2
2	0,7	2	2	1	3	2
3	0,1	2	3	2	3	3

В этой же таблице указаны интегральные оценки ущерба различных сценариев, определенные по логическим матрицам свертки Рис. 22. Из Табл. 6 следует, что первый и второй сценарии имеют интегральную оценку ущерба 2, а третий – 3. Поэтому вероятности возможных значений интегральных оценок ущерба равны, соответственно: $P_1=0$; $P_2=0,9$; $P_3=0,1$. Ожидаемый ущерб составляет $W' = 0 \times 1 + 0,9 \times 2 + 0,1 \times 3 = 2,1$, то есть, близок к ощутимому.

Для сравнения определим риск, предполагая ущербы различных типов независимыми случайными величинами. Для этого сначала определим вероятности p_{ij} того, что ущерб i -го типа имеет оценку j (Табл. 7).

Табл. 7. Вероятности сценариев и векторы ущербов

$i \backslash j$	1	2	3
1	0,2	0,8	0
2	0	0,9	0,1
3	0,9	0,1	0
4	0	0,2	0,8

Теперь, применяя описанный выше алгоритм, определяем вероятности возможных оценок материального и социального ущерба. Имеем:

$$\begin{aligned} W_{11} &= p_{11}p_{21} + p_{12}p_{21} = 0; \\ W_{12} &= p_{11}(p_{22} + p_{23}) + p_{12}p_{22} + p_{13}p_{21} = 0,92; \\ W_{13} &= p_{12}p_{23} + p_{13}(p_{22} + p_{23}) = 0,08, \\ W_{21} &= p_{31}p_{41} + p_{32}p_{41} + p_{31}p_{42} + p_{32}p_{42} = 0,2, \\ W_{22} &= p_{31}p_{43} + p_{33}p_{41} = 0,72, \\ W_{23} &= p_{32}p_{43} + p_{33}p_{42} + p_{33}p_{43} = 0,08. \end{aligned}$$

Далее определяем распределение вероятностей возможных оценок интегрального ущерба:

$$\begin{aligned} P_1 &= W_{11}(W_{21} + W_{22}) = 0; \\ P_2 &= W_{11}W_{23} + W_{12}(W_{22} + W_{21}) = 0,85; \\ P_3 &= W_{12}W_{23} + W_{13}W_{23} + W_{13}W_{22} + W_{13}W_{21} = 0,15. \end{aligned}$$

Интегральная оценка риска равна:

$$\hat{W}' = 0 \times 1 + 0,85 \times 2 + 0,15 \times 3 = 2,15.$$

Сравнивая с результатами сценарного подхода, видим, что оценки и вероятностей и риска отличаются, хотя и незначительно ($\hat{W} \approx W'$).

Предлагаемые алгоритмы позволяют определить интегральную оценку риска либо как комплексную оценку локальных рисков, либо как математическое ожидание комплексной оценки локальных ущербов.

Умея определять интегральный природно-техногенный риск, можно ставить и решать задачу управления, то есть разрабатывать программу снижения природно-техногенного риска до требуемого уровня с минимальными затратами. Далее рассматривается постановка и решение этой задачи для случая, когда интегральный природно-техногенный риск определяется как комплексная оценка локальных рисков. Для этого случая удастся предложить эффективный метод разработки оптимальной программы снижения природно-техногенных рисков.

Методы разработки оптимальной программы снижения природно-техногенных рисков. Снижение интегральной оценки природно-техногенного риска достигается за счет проведения мероприятий, снижающих локальные риски по различным показателям. Ранее были выделены четыре показателя снижения природно-техногенного риска (см. Рис. 21):

- показатель 1 связан с мероприятиями, снижающими экономический риск;
- показатель 2 – экологический риск;
- показатель 3 – риск людских потерь;
- показатель 4 – риск ухудшения условий жизни.

Теперь следует определить оптимальный набор мероприятий, так изменяющий существенные параметры, чтобы ущерб был не больше заданного, а стоимость проведения всех мероприятий при этом была минимальна. Поставленная задача решается на основе уже построенного ранее дерева комплексного оценивания риска. Для этого необходимо определить, как надо изменить первичные параметры объекта, чтобы величина ожидаемого ущерба стала допустимой. После этого любое изменение каждого первичного параметра будем связывать с конкретным мероприятием, имеющим свою стоимость. Для определения оптимального набора таких мероприятий строится, так называемая, *сеть напряженных вариантов*, каждый из которых является Парето-оптимальным (см. определение оптимальности по Парето, например, в [50]). Затем применяется алгоритм, выбирающий набор мероприятий минимальной стоимости.

Примем для определенности, что исходное состояние объекта (например, региона) характеризуется высокими локальными рисками (оценка 3) по всем показателям. Соответственно, интегральная оценка также равна 3 (высокий или существенный риск). Снижение локального риска по каждому показателю требует затрат на проведение соответствующих мероприятий. Обозначим C_{ij} – затраты на снижение локального риска по показателю i до оценки j , $i = 1, \dots, 4$, $j = 1, \dots, 3$ (C_{i3} соответствует затратам на поддержание локального риска на том же уровне).

Поставим задачу разработать вариант программы снижения интегрального риска до оценки 2 (средний или ощутимый риск) с минимальными затратами. Каждый вариант программы будем описывать вектором локальных рисков. Так, вариант (2, 1, 2, 3) означает, что реализация программы обеспечивает снижение экономического риска до среднего уровня, экологического – до низкого уровня, риска людских потерь – до среднего уровня, а риск ухудшения условий жизни остается высоким. Интегральный риск при этом равен 2, то есть данный вариант программы является допустимым. Затраты на реализацию данного варианта составляют

$$C(2, 1, 2, 3) = C_{12} + C_{21} + C_{32} + C_{43}.$$

Для разработки программы, минимальной по стоимости, можно рассмотреть все допустимые варианты, и выбрать из них вариант с минимальными затратами. Однако при большом числе локальных рисков и большом числе возможных оценок локальных рисков число допустимых вариантов становится большим, и простой перебор не эффективен. Поэтому обычно ограничиваются множеством напряженных вариантов.

Вариант программы называется *напряженным*, если увеличение локального риска хотя бы по одному показателю приводит к увеличению интегрального риска [65].

Важность понятия напряженного варианта связана с тем, что, как легко показать, оптимальный вариант программы является напряженным вариантом. Действительно, пусть имеется допустимый ненапряженный вариант. Тогда существует показатель, по которому можно увеличить локальный риск без изменения оценки интегрального риска. Очевидно, что новый вариант является допустимым и требует меньших затрат.

Опишем алгоритм построения всех напряженных вариантов. Заметим, что напряженный вариант по существу является Парето-оптимальным вариантом. Определение Парето-оптимальных вариантов при дискретных шкалах оценок – задача известная, и для двух критериев (обобщенных оценок, свертка которых определяется одной матрицей) алгоритм также известен. Дадим его краткое описание.

Рассматриваем последний столбец матрицы и определяем максимальную строку с требуемой оценкой (в данном случае нумерация столбцов идет справа налево, а строк – сверху вниз – см. Рис. 22). Для этой строки определяем максимальный столбец с требуемой оценкой. Эта оценка будет определять напряженный вариант. Далее, начиная со столбца с меньшим номером (на единицу), повторяем процедуру, и т.д. Будем для краткости обозначать этот базовый алгоритм символом N . Для описания всех напряженных вариантов применяем алгоритм N к матрице интегральной оценки (корневая вершина дерева критериев). Заметим, что каждому напряженному варианту матрицы интегральной оценки соответствуют две обобщенные оценки следующего уровня дерева критериев. Для каждой из них находим все напряженные варианты в соответствующих матрицах обобщенных оценок (применяя алгоритм N). Продолжаем таким образом строить сеть напряженных вариантов.

Сеть напряженных вариантов для рассматриваемого примера приведена на Рис. 23. В ней чередуются вершины двух типов. Вершины одного типа обозначены квадратами, в которых указаны значения обобщенных оценок, для которых нужно определить напряженные варианты в соответствующих матрицах (вход сети всегда квадрат, в котором указано значение комплексной оценки, а выходы – квадраты, в которых указаны значения оценок). Вершины-квадраты соединены дугами с вершинами-кружками, в которых указаны все напряженные варианты для данной обобщенной оценки. Любому напряженному варианту соответствует прадререво (подграф сети) с корнем в начальной вершине. В каждую вершину-кружок этого прадререва заходит только одна дуга от вершины-квадрата более высокого уровня, а из каждой вершины-кружка выходят две дуги к вершинам-квадратам более низкого уровня (на Рис. 23 один из вариантов выделен жирным дугами). Построив сеть напряженных вариантов, можно определить их количество. Для этого присваиваем выходным вершинам сети (квадратам) индекс 1.

Индексы вершин-кружков являются произведением индексов смежных им вершин-квадратов нижнего уровня, а индексы вершин-квадратов получаются сложением индексов смежных им вершин-кружков нижнего уровня. Двигаясь таким образом снизу вверх, определяем индекс входной вершины сети. Значение этого индекса определяет число напряженных вариантов. Для сети Рис. 23 число напряженных вариантов равно семи (индексы указаны в квадратных скобках у соответствующих вершин).

Пусть построена сеть напряженных вариантов. Для определения *варианта минимальной стоимости* присваиваем выходам сети индексы, равные затратам на реализацию соответствующих мероприятий. Двигаясь снизу вверх, определяем индексы остальных вершин. При этом индекс вершин-кружков равен сумме индексов соответствующих вершин-квадратов более низкого уровня, а индекс вершин-квадратов равен минимальному из индексов смежных с ним вершин-кружков более низкого уровня. Индекс вершины-входа будет равен величине минимальных затрат. Обоснование алгоритма следует из очевидного факта, что индекс любой вершины-квадрата при описанном способе вычисления индексов равен минимальным затратам на получение требуемой величины соответствующей обобщенной оценки.

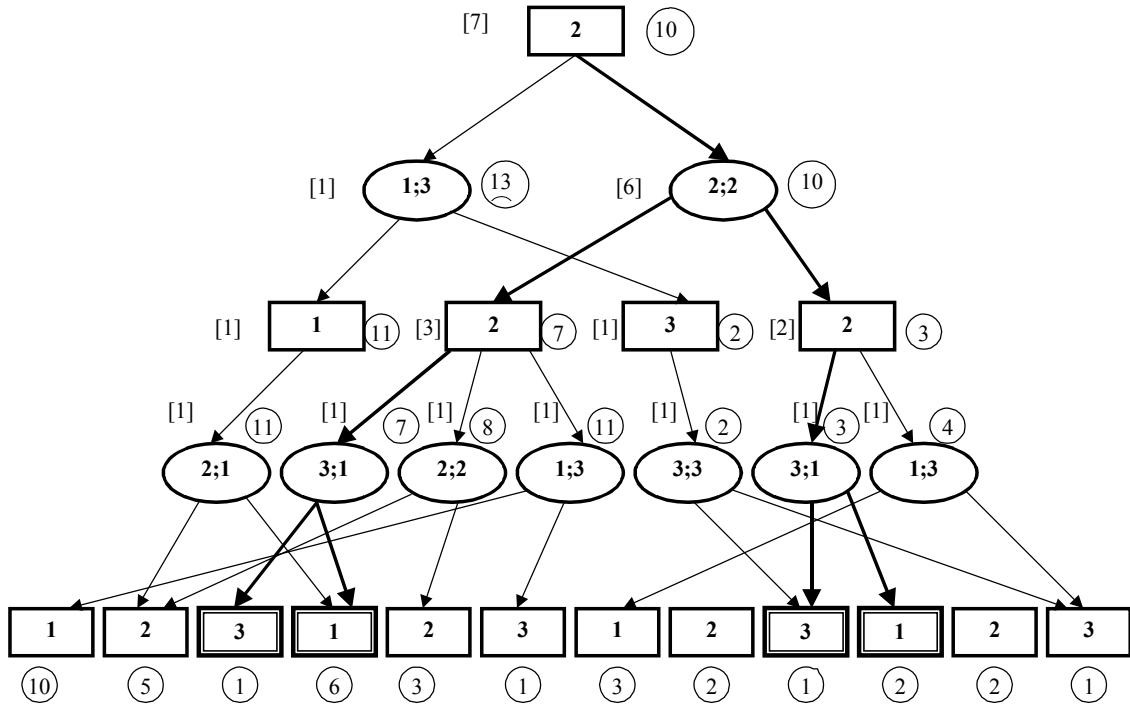


Рис. 23. Сеть напряженных вариантов

Вариант, соответствующий минимальной стоимости, определяется алгоритмом «обратного хода». Начиная с вершины верхнего уровня (входа сети), определяем вершину-кружок с минимальным индексом. Для смежных с ней вершин-квадратов более низкого уровня также определяем вершины-кружки более низкого уровня с минимальными индексами и т.д. Если оптимальных вариантов несколько, то можно построить подсеть оптимальных вариантов (их число определяется так же, как и число всех напряженных вариантов).

Оптимальный набор мероприятий в рассматриваемом примере получился следующим: (3, 1, 3, 1), а функционал цели равным 10. Выбранные мероприятия на Рис. 23 выделены двойными линиями. Таким образом, задача решена.

Задача оптимизации программы по стоимости с учётом риска, то есть задача обеспечения требуемого уровня риска с минимальными затратами, является сложной комбинаторной задачей, эффективные методы решения которой еще предстоит разработать. Однако, если принять, что мероприятия по различным рискам независимы, можно применить описанный выше алгоритм. Заметим, что произведение вероятностей достижения требуемых величин ущерба (после проведения мероприятий рассматриваемого варианта программы) дает оценку снизу вероятности получить требуемую величину полного ущерба. Поставим задачу оптимизации программы по стоимости при условии, что нижняя оценка вероятности получить требуемую величину ущерба не ниже заданной. Эта задача сводится к описанной выше задаче оптимизации по стоимости, если вероятности p_{ij} не зависят от j , то есть затраты на мероприятия на обеспечение ущерба на уровне j по показателю i выбраны таким образом, что вероятность получить оценку ущерба j не зависит от j .

Таким образом, при помощи описанного подхода можно не только определять уровень риска, но и оптимизировать затраты на его уменьшение. На сегодняшний день известны ряд обобщений описанных процедур комплексного оценивания (в том числе – *процедуры нечеткого комплексного оценивания*) и их программных реализаций – см. [98, 154, 155].

Таким образом, в настоящем разделе описаны методы формирования оптимальных программ снижения уровня риска. Выше считалось, что оценки локальных рисков и ущербов, а также их зависимости от затрат (материальных, финансовых, временных и т.д.) известны. Однако управление локальными рисками представляет собой самостоятельную задачу – для снижения локальных рисков и

ущербов необходимо использование соответствующих *механизмов управления*, как на уровне отдельных предприятий – источников рисков, так и на уровне территории или региона в целом. Поэтому перейдем к рассмотрению собственно механизмов управления, сначала на уровне предприятия (глава 2), а затем – на уровне региона (глава 3).

ГЛАВА 2. МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА УРОВНЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

В дальнейшем в работе рассматривается модель региона, в котором функционируют n хозяйственных объектов (например, *предприятий*), деятельность которых может привести к возникновению чрезвычайной ситуации (ЧС) на предприятии, то есть уменьшает уровень безопасности (увеличивает уровень риска) региона.

Ответственность за безопасность региона возложена на органы власти (*центр*). Полномочия, которыми располагает центр – это применение различных экономических механизмов, направленных на снижение риска. Например, распределение между предприятиями централизованного фонда, средства которого направляются предприятиями на повышение безопасности; стимулирование деятельности предприятий по снижению техногенного и природного риска; наложение штрафа на предприятия за превышение допустимого уровня риска; взимание платы с предприятий за риск и т.д.

В рыночной экономике эффективность функционирования предприятия определяется получаемой им *прибылью*. Если считать, что вся выпущенная предприятием продукция реализуется, то прибыль i -го предприятия можно записать в виде¹²

$$f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - v_i,$$

где $u_i \geq 0$ – *объем продукции*, выпускаемой на i -м предприятии;

$c_i \geq 0$ – *цена продукции*, выпускаемой на i -м предприятии;

$v_i \geq 0$ – *затраты* предприятия на предупредительные и/или природоохранные мероприятия;

$z_i(u_i)$ – *затраты* предприятия на выпуск продукции в объеме u_i .

¹² Условимся здесь и далее считать, что, если некоторое выражение записано для произвольного предприятия, то оно, если не оговорено особо, справедливо и для всех остальных предприятий (с точностью до их нумерации).

В действительности предприятие заинтересовано не в увеличении прибыли как таковой, а лишь в той части прибыли, которая остается в его распоряжении, так как именно из прибыли предприятие осуществляет различные обязательные выплаты, такие как: налоги, всевозможные платежи, и, возможно, штрафы.

Размер обязательных выплат и показатели, от которых эти выплаты зависят, определяются действующим экономическим механизмом.

Обозначим через y_i уровень безопасности i -го предприятия. Параметры экономического механизма настраиваются в соответствии с наблюдаемым или измеряемым уровнем безопасности. Например, если χ_i – размер штрафов за недостижение требуемого уровня безопасности x_i , то прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия, может быть записана в виде $f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - \chi_i(x_i, y_i)$, где

$$\chi_i(x_i, y_i) = \begin{cases} \chi_i(y_i), & \text{если } y_i < x_i, \\ 0, & \text{если } y_i \geq x_i. \end{cases}$$

В случае, когда применяется экономический механизм платы за риск, то $\chi_i(x_i, y_i) = \lambda_i(x_i - y_i)$, $y_i \leq x_i$, где λ_i – цена риска для i -го предприятия.

Если для управления уровнем риска используется механизм централизованного финансирования мероприятий по снижению уровня риска, то при этом в первую очередь должны быть решены вопросы, связанные с формированием централизованных фондов и, соответственно, определены процедуры распределения средств из этих фондов. Кроме того, должны быть известны мероприятия по снижению уровня риска, финансирование которых осуществляется из выделяемых средств.

И, наконец, при использовании механизма налогообложения как средства побуждения к снижению уровня риска

$$\chi_i = [\rho_0 - \rho(y_i)] [c_i u_i - z_i(u_i)],$$

где ρ_0 – базовая ставка налогообложения, $\rho(y_i)$ – величина снижения базовой ставки в зависимости от уровня безопасности.

В дальнейшем будем считать, что уровень безопасности i -го предприятия, зависит от объема выпускаемой им продукции u_i и объема средств v_i , направляемых на совершенствование технологии, на предупреждение возникновения нештатных ситуаций, укрепление производственной и технологической дисциплины, на природо-

охранные мероприятия. То есть $y_i = y_i(u_i, v_i)$, причем, если y интерпретируется как уровень риска, то¹³

$$(1) \quad y_i(0, v_i) = 0, \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial u_i} \geq 0, \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial v_i} \leq 0, \quad \frac{\partial^2 y_i(u_i, v_i)}{\partial v_i^2} \geq 0;$$

если же y интерпретируется как уровень безопасности, то

$$(1') \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial u_i} \leq 0, \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial v_i} \geq 0, \quad \frac{\partial^2 y_i(u_i, v_i)}{\partial v_i^2} \leq 0.$$

Содержательно условие (1) означает, что: при отсутствии производства отсутствует и риск; с ростом объема выпуска при неизменных затратах на природоохранные мероприятия уровень риска не убывает; с ростом затрат на природоохранные мероприятия при неизменном объеме выпуска уровень риска не возрастает; при неизменном объеме выпуска каждое последующее вложение средств в природоохранные мероприятия приносит всё меньший эффект (приводит к всё меньшему снижению уровня риска).

Так как в регионе могут находиться различные предприятия, и от аварий на этих предприятиях могут быть различные потери, то важно учитывать не только вероятность возникновения ЧС, но и *ущерб* от этих ЧС. Обозначим через W_i возможный полный ущерб в регионе при возникновении ЧС на i -м предприятии. В дальнейшем одной из важнейших характеристик возможной ЧС на i -м предприятии будем считать ожидаемый ущерб, который можно определить как¹⁴ $E W_i$. Если события, заключающиеся в возникновении ЧС на различных предприятиях, независимы¹⁵, то возможный полный ущерб в регионе $E W$, связанный с деятельностью всех предприятий, расположенных на его территории, можно записать как

$$EW = \sum_{i=1}^n E W_i$$

Ожидаемый ущерб отражает эффект негативного воздействия на эколого-экономическую систему.

¹³ В настоящей работе принята независимая внутри подразделов нумерация формул.

¹⁴ Символ « E » здесь и далее обозначает математическое ожидание.

¹⁵ Необходимо признать, что данное предположение является достаточно сильным и нарушается в случае, когда ЧС на нескольких предприятиях региона вызваны одними и теми же причинами (например, природной катастрофой), или ЧС на одном из предприятий приводит к серии ЧС на соседних предприятиях и т.п.

2.1. МЕХАНИЗМЫ ШТРАФОВ

Повысить заинтересованность предприятий в обеспечении требуемого уровня риска можно с помощью *механизма штрафов* [13, 95, 96, 158, 159]. При применении этого механизма для предприятия устанавливается предельно допустимый уровень риска x . В этом случае прибыль предприятия может быть записана в виде

$$f = c u - z(u) - \begin{cases} \chi(y), & \text{если } y > x, \\ 0, & \text{если } y \leq x. \end{cases}$$

Наиболее распространенные виды функций штрафа следующие (см. также введение, в котором описаны кусочно-линейные функции платы за загрязнение):

- штраф за превышение допустимого уровня риска $\chi(y) = \chi$;
- штраф за превышение допустимого уровня риска с дальнейшим линейным ростом $\chi(y) = \mu y$, где μ – коэффициент функции штрафа;
- ступенчатая функция штрафа:

$$\chi(y) = \begin{cases} \chi_1, & \text{если } y \in [x_1; x_2), \\ \chi_2, & \text{если } y \in [x_2; x_3), \\ \dots \\ \chi_k, & \text{если } y \geq x_k. \end{cases}$$

Для того чтобы использовать такую ступенчатую функцию штрафов, необходимо задать несколько порогов превышения минимального допустимого уровня риска – x_1, x_2, \dots, x_k .

Рассмотрим более подробно случай, когда прибыль предприятия определяется выражением

$$f = cu - z(u) - \begin{cases} \chi, & \text{если } y > x, \\ 0, & \text{если } y \leq x. \end{cases}$$

Будем считать, что действует *механизм сильных штрафов* [26]. Это значит, что для предприятия превышение допустимого уровня риска всегда оказывается невыгодным. Кроме того, в дальнейшем будем считать, что затраты на выпуск продукции являются действительнозначной, неотрицательной, возрастающей, выпуклой, имеющей непрерывную производную, функцией, то есть

$$(1) \quad z(0) = 0, \quad \frac{dz(u)}{du} > 0, \quad \frac{d^2z(u)}{du^2} > 0,$$

причем

$$(2) \left. \frac{dz(u)}{du} \right|_{u=0} = 0, \left. \frac{dz(u)}{du} \right|_{u \rightarrow \infty} \rightarrow \infty$$

Предположим также, что задача предприятия заключается в максимизации остающейся в распоряжении предприятия прибыли. Следовательно, при определении объема выпуска предприятие решает задачу

$$(3) \begin{cases} cu - z(u) - v \rightarrow \max_{(u,v)}, \\ y(u, v) \leq x. \end{cases}$$

Пусть u^* – решение уравнения

$$(4) \frac{df}{du} = c - \frac{dz(u)}{du} = 0.$$

Если $y(u^*, 0) \leq x$, то предприятие выпускает такой объем продукции u^* , который обеспечивает ему получение максимальной прибыли, и при этом предприятие не тратит свои средства на снижение уровня риска. Если же

$$(5) y(u^*, 0) > x,$$

то предприятие должно либо сократить объем выпуска до размеров u^{**} , таких что

$$(6) y(u^{**}, 0) = x,$$

либо потратить часть своих собственных средств на снижение уровня риска, либо комбинировать эти подходы. Другими словами, предприятие решает либо задачу (6) и получает прибыль в размере $f^{**} = cu^{**} - z(u^{**})$, либо задачу (3) и получает прибыль в размере $f' = cu' - z(u') - v'$, где u' и v' – решение задачи (3). Ситуация $f' = f^{**}$ возникает лишь в случае

$$(7) u' = u^{**}, v' = 0.$$

Утверждение 2.1. Если используется механизм сильных штрафов, справедливо (5), $v' > 0$ и $u' \neq u^{**}$, то предприятию всегда выгодно превысить объем выпуска u^{**} , потратив при этом часть своих средств на снижение уровня риска.

Доказательство утверждения 2.1. Необходимо доказать справедливость неравенства $f' \geq f^{**}$. Если бы $f' < f^{**}$, то пара $(u^{**}, 0)$ являлась

бы решением задачи (3), но это противоречит условию утверждения. Нетрудно видеть, что $u' > u^{**}$, в противном случае

$$x = y(u^{**}, 0) < y(u', v'),$$

но тогда u' и v' не являются решением задачи (3), в силу условия (1), приведенного во введении к настоящей главе. Утверждение 2.1 доказано.

Следствие. При выполнении условий утверждения 2.1 выполняется соотношение $u' \leq u^*$.

Действительно, если бы было $u' > u^*$, то можно было бы записать $y(u', 0) > y(u^*, 0)$. В то же время, $cu^* - z(u^*) \geq cu' - z(u')$. Но в силу условия (1), приведенного во введении к настоящей главе, и (3) $y(u', v') = x > y(u^*, v')$ и при этом $cu^* - z(u^*) - v' \geq cu' - z(u') - v'$, а отсюда следует, что u' и v' не являются решением задачи (3), и это противоречие доказывает следствие. Содержательно, при введении сильных штрафов объем выпуска всегда не увеличивается; предприятие заинтересовано в усилиях по снижению уровня риска, поскольку без них объем выпуска придется еще сократить.

Решение задачи (3) проводится в следующей последовательности:

– строится Лагранжиан (λ_0 – множитель Лагранжа)

$$L = cu - z(u) - v - \lambda_0 (y(u, v) - x);$$

– ищутся производные по всем переменным, и решается полученная система уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial u} = c - \frac{\partial z(u)}{\partial u} - \lambda_0 \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial v} = -1 - \lambda_0 \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_0} = y(u, v) - x = 0. \end{cases}$$

Из второго уравнения этой системы получаем $\lambda_0 = -\frac{1}{\frac{\partial y(u, v)}{\partial v}}$.

Подставив это выражение в первое уравнение, имеем

$$(8) \begin{cases} c - \frac{\partial z(u)}{\partial u} + \frac{1}{\frac{\partial y(u, v)}{\partial v}} \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ y(u, v) - x = 0. \end{cases}$$

Таким образом, u' и v' являются решением системы (8).

В дальнейшем в качестве иллюстративного примера будем рассматривать следующую зависимость уровня риска от объема выпуска и размера средств на снижение уровня риска [158]

$$(9) y(u, v) = \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v)},$$

где $\omega(u)$ и $\theta(v)$ – известные дважды непрерывно дифференцируемые функции, такие что

$$(10) \omega(0) = \left. \frac{d\omega(u)}{du} \right|_{u=0} = 0, \quad \frac{d\omega(u)}{du} > 0, \quad \frac{d^2\omega(u)}{du^2} \geq 0,$$

$$(11) \theta(0) = T, \quad \left. \frac{d\theta(v)}{dv} \right|_{v=0} \neq 0, \quad \frac{d\theta(v)}{dv} > 0, \quad \frac{d^2\theta(v)}{dv^2} \leq 0.$$

В этом случае система (8) может быть представлена в виде¹⁶

$$(12) \begin{cases} c - \frac{dz(u)}{du} - \frac{\omega'\theta}{\omega\theta'} = 0, \\ \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v)} - x = 0. \end{cases}$$

Выразив из второго уравнения системы (12) $\theta(v)$, а затем, выразив v как функцию u и x , и подставив его в первое уравнение, получаем уравнение относительно u :

$$(13) c - \frac{dz(u)}{du} - \frac{1-x}{x} \frac{\omega'}{\left. \frac{d\theta}{dv} \right|_{v=v(u,x)}} = 0.$$

Утверждение 2.2. Для того чтобы уравнение (13) имело решение, достаточно, чтобы выполнялись условия (1), (2) и (10), (11).

Доказательство утверждения 2.2. Обозначим

¹⁶ Символ «'» у функции здесь и иногда ниже обозначает производную, нижний индекс обозначает переменную, по которой производная вычисляется

$$\Psi(u) = \frac{dz(u)}{du} + \frac{1-x}{x} \frac{\omega'}{\left. \frac{d\theta}{dv} \right|_{v=v(u,x)}}.$$

В силу условий (2) и (10) $\Psi(0) = 0$. С другой стороны, в силу условий (1), (10) и (11) можно подобрать такое \tilde{u} , чтобы было спра-

ведливо неравенство
$$\Psi(u) = \left. \frac{dz(u)}{du} \right|_{u=\tilde{u}} + \frac{1-x}{x} \frac{\left. \frac{d\omega}{du} \right|_{u=\tilde{u}}}{\left. \frac{d\theta}{dv} \right|_{v=v(\tilde{u},x)}} > c.$$

Таким образом, непрерывная функция $\Psi(u)$ определена на отрезке $[0, \tilde{u}]$ и в крайних точках этого отрезка она принимает не равные значения $\Psi(0) < \Psi(\tilde{u})$, а по теореме о промежуточном значении функции, для любого $\Psi(0) < c < \Psi(\tilde{u})$ существует, по меньшей мере, одна такая точка \hat{u} , $0 < \hat{u} < \tilde{u}$, что $\Psi(\hat{u}) = c$. Этот вывод и доказывает утверждение 2.2.

Таким образом, изменяя предельно допустимый уровень риска x , можно влиять на объем выпуска продукции на предприятии и на объем средств, выделяемых предприятием на снижение уровня риска.

Утверждение 2.3. Если зависимость уровня риска от объема выпуска и размера средств на снижение уровня риска определяются выражением (9), и выполняются условия (10), то уменьшение допустимого уровня риска всегда приводит к уменьшению объема выпуска.

Доказательство утверждения 2.3. Необходимо показать, что $\frac{du}{dx} > 0$. Из второго уравнения системы (12) получаем

$\theta(v) = \omega(u) \frac{1-x}{x}$. Подставив это значение в первое уравнение системы (12), можно записать

$$(14) \quad \begin{cases} \hat{F}(x, u, v) = c - \frac{dz(u)}{du} - \frac{1-x}{x} \frac{\omega'(u)}{\theta'(v)} = 0, \\ \hat{\Phi}(x, u, v) = \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v)} - x = 0. \end{cases}$$

Эта система уравнений задает две функции одной переменной $u(x)$ и $v(x)$. Производные этих функций, заданных системой (14), записываются в виде

$$(15) \frac{du}{dx} = \frac{\hat{F}'_v \hat{\Phi}'_x - \hat{F}'_x \hat{\Phi}'_v}{\hat{F}'_u \hat{\Phi}'_v - \hat{F}'_v \hat{\Phi}'_u}$$

и, соответственно,

$$(16) \frac{dv}{dx} = \frac{\hat{F}'_x \hat{\Phi}'_u - \hat{F}'_u \hat{\Phi}'_x}{\hat{F}'_u \hat{\Phi}'_v - \hat{F}'_v \hat{\Phi}'_u}.$$

Так $\hat{F}'_x = \frac{1}{x^2} \frac{\omega'(u)}{\theta'(v)}$, $\hat{F}'_u = -\frac{d^2 z(u)}{du^2} - \frac{1-x}{x} \frac{\omega''(u)}{\theta'(v)}$,
 $\hat{F}'_v = \frac{1-x}{x} \frac{\omega'(u)\theta''(v)}{[\theta'(v)]^2}$, $\hat{\Phi}'_x = -1$, $\hat{\Phi}'_u = x(1-x) \frac{\omega'(u)}{\omega(u)}$ и
 $\hat{\Phi}'_v = -\frac{\theta'(v)}{\omega(u)} x^2$, то (15) можно переписать как

$$\frac{du}{dx} = \frac{\frac{\omega'(u)}{\omega(u)} - \frac{1-x}{x} \frac{\omega'(u)\theta''(v)}{[\theta'(v)]^2}}{\left[\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \frac{1-x}{x} \frac{\omega''(u)}{\theta'(v)} \right] \frac{\theta'(v)}{\omega(u)} x^2 - (1-x)^2 \frac{\theta''(v)[\omega'(u)]^2}{\omega(u)[\theta'(v)]^2}}.$$

Учитывая условия (10) и (11), можно утверждать, что числитель и знаменатель этой дроби положительны, поэтому $\frac{du}{dx} > 0$. Утверждение 2.3 доказано.

Содержательно, результат утверждения 2.3 – довольно естественный вывод. Чем более высокие требования предъявляются к уровню безопасности производства при действии механизма сильных штрафов, тем менее активно осуществляется производственная деятельность, что и приводит к снижению уровня выпуска продукции. Но при этом остается вопрос: «Как изменяется объем средств, выделяемых предприятием для снижения уровня риска, если происходит изменение допустимого уровня риска?».

Для этого определим количество собственных средств v_8 , которое выделяет предприятие на снижение уровня риска, если допустимый уровень риска принимает значение

$$x = y(u^*, 0) - \delta = \frac{\omega(u^*)}{\omega(u^*) + T} - \delta,$$

где $\delta > 0$ – малая величина. Для максимизации своей прибыли предприятие решает задачу (3), которую можно записать в виде

$$\begin{cases} cu - z(u) - v \rightarrow \max \\ \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v)} = \frac{\omega(u^*)}{\omega(u^*) + T} - \delta. \end{cases}$$

Пусть u_δ и v_δ – решение этой задачи. Тогда справедливо выражение

$$\delta = \frac{\omega(u^*)\theta(v_\delta) - \omega(u_\delta)T}{(\omega(u^*) + T)[\omega(u_\delta) + \theta(v_\delta)]}.$$

Очевидно, что при $\delta \rightarrow 0$ $\omega(u^*)\theta(v_\delta) - \omega(u_\delta)T \rightarrow 0$ или

$$(17) \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\omega(u_\delta)}{\theta(v_\delta)} = \frac{\omega(u^*)}{T}.$$

Докажем, что при $\delta \rightarrow 0$ $u_\delta \rightarrow u^*$ и $v_\delta \rightarrow 0$. Обозначим $\lim_{\delta \rightarrow 0} u_\delta = u_0$ и $\lim_{\delta \rightarrow 0} v_\delta = v_0$. Из следствия к утверждению 2.1 следует, что $u_\delta \leq u^*$ и $v_\delta > 0$. Пусть $u_0 < u^*$, тогда в силу (10) справедливо $\omega(u_0) < \omega(u^*)$, поэтому даже если $v_0 = 0$, равенство (17) выполняться не будет. А это означает, что при $\delta \rightarrow 0$ $u_\delta \rightarrow u^*$ и $v_\delta \rightarrow 0$.

Фактически показано, что небольшое превышение $y(u^*, 0)$ над допустимым уровнем риска не приводит к скачку средств, выделяемых предприятием на снижение уровня риска. Этот рост происходит постепенно, по мере уменьшения x . С другой стороны, из утверждения 2.3 следует, что по мере уменьшения x происходит уменьшение объема выпуска. Очевидно, что на всем диапазоне уменьшения x от $y(u^*, 0)$ до 0 одновременное увеличение объема средств, выделяемых предприятием на снижение уровня риска, и уменьшение объема выпуска, происходить не может. Действительно, так как уменьшается объем выпуска, то падает и прибыль предприятия, а это может привести к тому, что прибыль предприятия упадет настолько, что окажется меньше объема средств, которые необходимо выделить на снижение уровня риска. То есть, прибыль за вычетом средств на

снижение уровня риска окажется отрицательной. В то же время, предприятие может просто определить объем выпуска из условия (6), который обеспечит для него положительную прибыль и при этом $v = 0$. Следовательно, при некотором достаточно маленьком $x = x_m$ из решения системы (12) можно получить $v' = 0$. А это значит, что при уменьшении x на отрезке $[x_m; y(u^*, 0)]$ значение переменной v' сначала возрастает от нуля до некоторой величины, а потом убывает до нуля. А в этом случае производная $\frac{dv}{dx}$ должна быть сначала положительной, а потом отрицательной.

Перепишем (16) в виде

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\frac{1-x}{x} \frac{[\omega'(u)]^2}{\omega(u)\theta'(v)} - \left[\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \frac{1-x}{x} \frac{\omega''(u)}{\theta'(v)} \right]}{\left[\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \frac{1-x}{x} \frac{\omega''(u)}{\theta'(v)} \right] \frac{\theta'(v)}{\omega(u)} x^2 - (1-x)^2 \frac{\theta''(v)[\omega'(u)]^2}{\omega(u)[\theta'(v)]^2}}.$$

Знаменатель этой дроби положителен. Поэтому знак производной определяется числителем. Запишем его в виде

$$-\left\{ \frac{1-x}{x\theta'(v)} \frac{\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2}{\omega(u)} + \frac{d^2 z(u)}{du^2} \right\}.$$

Легко видеть, что $\frac{dv}{dx}$ может менять знак, если $\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2 < 0$.

Обозначим $\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2 = [\omega(u)]^2 \Xi(u)$, где $\Xi(u) < 0$, тогда можно записать $\frac{\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2}{[\omega(u)]^2} = \Xi(u)$. Это выражение

представим в виде $\frac{\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2}{[\omega(u)]^2} = \left(\frac{\omega'(u)}{\omega(u)} \right)' = \Xi(u)$. Интегрируя его, получаем $\frac{\omega'(u)}{\omega(u)} = \int \Xi(u) du$. В свою очередь, это выраже-

ние можно представить в виде $[\ln \omega(u)]' = \int \Xi(u) du$, интегрируя которое, получаем $\ln \omega(u) = \int \Xi(u) du$.

Из этого равенства можно определить $\omega(u) = e^{\int \Xi(u) du}$. Таким образом, задавая функцию $\Xi(u) < 0$, можно определить $\omega(u)$.

Пусть $\Xi(u) = -\frac{k}{u^2}$, где $k > 0$, тогда $[\ln \omega(u)]' = \frac{k}{u} + C_1$. Интегрируя еще раз, получаем $\ln \omega(u) = k \ln u + C_1 u + C_2$ или

$$(18) \omega(u) = u^k e^{C_1 u + C_2}$$

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим следующий пример. Пусть

$$(19) z = \frac{1}{2} r q \left(\frac{u^2}{q^2} + 1 \right), \omega(u) = w u^2, \theta(v) = \theta_0 v + T,$$

где q – объем продукции, обеспечивающий предприятию минимальную себестоимость продукции; r – минимальная себестоимость; w – коэффициент, характеризующий влияние объема выпуска продукции на уровень природно-техногенного риска; θ_0 – коэффициент, характеризующий эффективность использования средств, направляемых на снижение уровня риска; T – показатель, характеризующий безопасность производства.

Зависимость $\omega(u) = w u^2$ получается из (18), если положить $k = 2, C_1 = 0, w = e^{C_2}$. Тогда

$$(20) y(u, v) = \frac{w u^2}{w u^2 + \theta_0 v + T}.$$

Если бы при функционировании предприятия не накладывались ограничения на уровень риска, объем выпуска составил бы величину

$$u^* = \frac{c q}{r}, \text{ а уровень риска был бы равен } y^* = \frac{w c^2 q^2}{w c^2 q^2 + T r^2}.$$

Если же допустимый уровень риска x таков, что $y^* > x$, то для определения объема выпуска необходимо решить систему уравнений (12), которую в этом случае можно переписать в виде

$$\begin{cases} c - \frac{r}{q}u - \frac{2(\theta_0 v - T)}{u\theta_0} = 0, \\ \frac{wu^2}{wu^2 + \theta_0 v + T} = x. \end{cases}$$

Решение этой системы дает:

$$u = \frac{\theta_0 q c x}{2q w (1-x) + \theta_0 r x}, \quad v = w \theta_0 q^2 c^2 \frac{x(1-x)}{[2q w (1-x) + \theta_0 r x]^2} - \frac{T}{\theta_0}.$$

Отсюда легко получить

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \theta_0 q c \frac{2q w}{[2q w + (2q w - \theta_0 r)x]^2} > 0,$$

и, соответственно,

$$\frac{\partial v}{\partial x} = w \theta_0 q^2 c^2 \frac{2q w - (2q w + \theta_0 r)x}{[\theta_0 r x + 2q w (1-x)]^3}.$$

Из последнего выражения видно, что

$$(21) \quad \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} > 0, & \quad \text{если} \quad x < \frac{2q w}{2q w + \theta_0 r}, \\ \frac{\partial v}{\partial x} > 0, & \quad \text{если} \quad x > \frac{2q w}{2q w + \theta_0 r}. \end{aligned}$$

То есть, существует такой уровень риска, при котором объем средств, направляемых предприятием на поддержание уровня безопасности, оказывается максимальным.

Пусть $r = 20$, $q = 200$, $c = 80$, $w = 0,01$, $\theta_0 = 0,8$ и $T = 1500$. Графики изменения объема выпуска и размера средств на поддержание уровня безопасности в зависимости от предельно допустимого уровня риска представлены на Рис. 24 и Рис. 25.

Из выражения (21) и Рис. 25 видно, что максимальный объем средств, направляемых на снижение уровня риска, предприятие направляет при установленном предельном уровне риске равным 0,2.

На Рис. 26 представлена зависимость изменения прибыли предприятия в зависимости от предельно допустимого уровня риска.

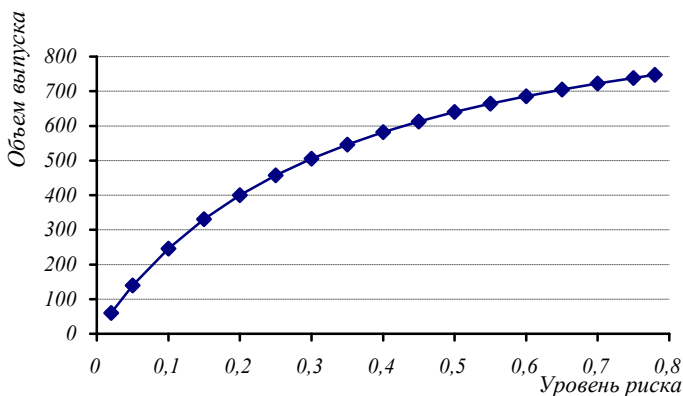


Рис. 24. Изменение объема выпуска в зависимости от предельно допустимого уровня риска

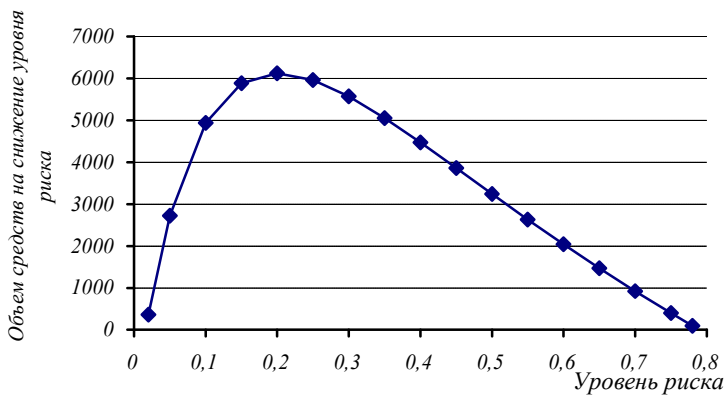


Рис. 25. Изменение размера средств на поддержание уровня риска в зависимости от предельно допустимого уровня риска

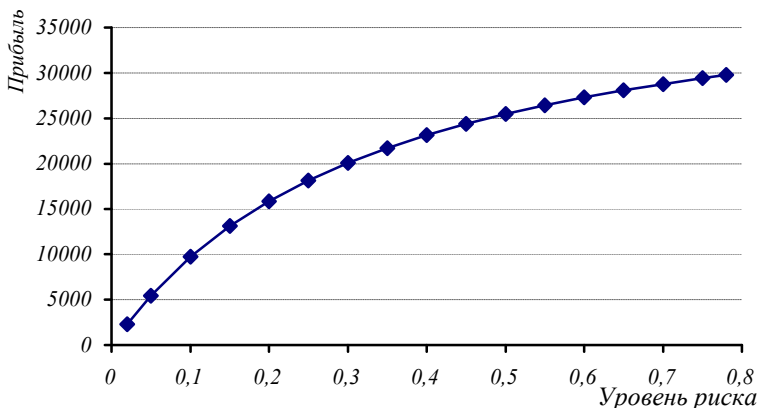


Рис. 26. Изменение прибыли в зависимости от предельно допустимого уровня риска

Анализ показывает, что в данном примере предприятию (при действии механизма сильных штрафов), имеет смысл начинать выпуск продукции, если предельно допустимый уровень риска больше 0,001, в противном случае производственная деятельность принесет предприятию только убытки.

2.2. МЕХАНИЗМЫ ПЛАТЫ ЗА РИСК

При использовании механизма платы за риск основным рычагом, позволяющим управлять уровнем риска, является цена риска λ , которая устанавливается центром [17, 32, 98, 157]. В этом случае прибыль предприятия определяется как

$$(1) f = c u - z(u) - \lambda y(u, v) - v.$$

Для максимизации своей прибыли предприятие определяет, сколько продукции $u \geq 0$ надо выпустить, и какой объем средств $v \geq 0$ необходимо направить на снижение уровня риска. Другими словами, предприятие решает задачу

$$(2) \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial u} = c - \frac{dz(u)}{du} - \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial v} = -\lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} - 1 = 0. \end{cases}$$

Пусть u^* и v^* – решение системы (2). Тогда u^* и v^* обеспечивают получение максимальной прибыли предприятию, если выполняются условия максимума:

$$(3) \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} = -\frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \lambda \frac{\partial^2 y}{\partial u^2} < 0,$$

$$(4) \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} = -\lambda \frac{\partial^2 y}{\partial v^2} < 0,$$

$$(5) \Delta = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial u \partial v} \right)^2 = \lambda \left(\frac{\partial^2 z}{\partial u^2} + \lambda \frac{\partial^2 y}{\partial u^2} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial v^2} - \lambda^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial u \partial v} \right)^2 > 0.$$

Утверждение 2.4. Если u^* и v^* – решение системы (2) и u^* и v^* обеспечивают предприятию получение максимальной прибыли, то увеличение цены риска всегда приводит к уменьшению объема выпуска.

Доказательство утверждения 2.4. Достаточно показать, что $\frac{du^*}{d\lambda} < 0$. Систему уравнений (2) запишем в виде

$$(6) \begin{cases} \tilde{F}(\lambda, u, v) = c - \frac{dz(u)}{du} - \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ \tilde{\Phi}(\lambda, u, v) = -\lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} - 1 = 0. \end{cases}$$

Эта система уравнений задает две функции одной переменной $u(\lambda)$ и $v(\lambda)$. Производная функции $u(\lambda)$ записывается в виде

$$(7) \frac{du}{d\lambda} = \frac{\tilde{F}'_v \tilde{\Phi}'_\lambda - \tilde{F}'_\lambda \tilde{\Phi}'_v}{\tilde{F}'_u \tilde{\Phi}'_v - \tilde{F}'_v \tilde{\Phi}'_u}.$$

Так как

$$(8) \begin{aligned} \tilde{F}'_\lambda &= -\frac{\partial y(u, v)}{\partial u}, \tilde{F}'_u = -\frac{\partial^2 z(u)}{\partial u^2} - \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2}, \tilde{F}'_v = -\lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v}, \\ \tilde{\Phi}'_\lambda &= -\frac{\partial y(u, v)}{\partial v}, \tilde{\Phi}'_u = -\lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v}, \tilde{\Phi}'_v = -\lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2}, \end{aligned}$$

то (6) можно переписать как

$$(9) \frac{du}{d\lambda} = \frac{\frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} - \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2}}{\left(\frac{\partial^2 z(u)}{\partial u^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} \right) \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2} - \lambda \left[\frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} \right]^2}.$$

Так как u^* и v^* обеспечивают предприятию получение максимальной прибыли, то в силу (5) знаменатель дроби (9) положителен. Рассмотрим теперь числитель этой дроби. Из выражения (9) предыдущего раздела следует, что

$$(10) \begin{aligned} \frac{\partial x(u, v)}{\partial v} &= -\frac{\omega(u)\theta'(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^2}, \quad \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2} = \omega(u) \frac{2[\theta'(v)]^2 - \theta''(v)[\omega(u) + \theta(v)]}{[\omega(u) + \theta(v)]^3}, \\ \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} &= \frac{\omega'(u)\theta(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^2}, \quad \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} = \theta(v) \frac{\omega''(u)[\omega(u) + \theta(v)] - 2[\omega'(u)]^2}{[\omega(u) + \theta(v)]^3}, \\ \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} &= \omega'(u)\theta'(v) \frac{\omega(u) - \theta(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^3}. \end{aligned}$$

Поэтому числитель дроби (9) можно записать как

$$-\omega'(u)\omega(u) \frac{[\theta'(v)]^2 - \theta''(v)\theta(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^4}.$$

Из выражений (2.1.10) и (2.1.11) следует, что это выражение меньше нуля, следовательно, $\frac{du^*}{d\lambda} < 0$. Утверждение 2.4 доказано.

Что касается изменения объема средств, направляемых на снижение уровня риска, то, проведя рассуждения аналогичные тем, которые были проведены выше при определении зависимости $v(x)$, легко показать, что с увеличением цены за риск объем средств, направляемых на снижение уровня риска предприятием, сначала возрастает, а потом падает. Действительно, производная функции

$$v(\lambda) \text{ записывается в виде } \frac{dv}{d\lambda} = \frac{\tilde{F}'_\lambda \tilde{\Phi}'_u - \tilde{F}'_u \tilde{\Phi}'_\lambda}{\tilde{F}'_u \tilde{\Phi}'_v - \tilde{F}'_v \tilde{\Phi}'_u}.$$

Выше было показано, что знаменатель этой дроби положителен, а числитель записывается как

$$(11) \tilde{F}'_\lambda \tilde{\Phi}'_u - \tilde{F}'_u \tilde{\Phi}'_\lambda = \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} - \left(\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} \right) \frac{\partial y(u, v)}{\partial v}.$$

Учитывая (10), можно переписать (11) в виде

$$\frac{\theta'(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^2} \left\{ \frac{\lambda\theta(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^2} [\omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2] + \omega(u) \frac{d^2z(u)}{du^2} \right\}.$$

А так как $\omega(u)$ таково, что

$$(12) \quad \omega(u)\omega''(u) - [\omega'(u)]^2 < 0,$$

то возможна ситуация, когда числитель (9) может принимать как положительное, так и отрицательное значение.

Естественным представляется допущение, что

$$(13) \quad \frac{dy_i}{d\lambda} < 0,$$

то есть с ростом платы за риск уровень риска падает. Тогда размер средств, который выплачивает предприятие в виде платы за риск, определяется выражением $\lambda y(u, v) = \lambda \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v)}$.

Утверждение 2.5. С ростом цены λ плата за риск сначала увеличивается, а потом уменьшается.

Доказательство утверждения 2.5. Вычислим

$$\frac{\partial \lambda y(u, v)}{\partial \lambda} = y(u, v) + \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial \lambda}.$$

Очевидно, что при $\lambda = 0$, $v = 0$, а $y(u, 0) > 0$, следовательно, плата за риск возрастает. В то же время, в силу (13) и при достаточно

большом значении λ уровень риска $y(u, v)$ мал, а $\lambda \frac{dy_i}{d\lambda} < 0$, поэтому

плата за риск убывает. Утверждение 2.5 доказано.

Пусть имеют место зависимости (19) и (20) предыдущего раздела. Тогда систему уравнений (2) для этого случая можно переписать

$$\text{в виде } \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial u} = c - \frac{r}{q}u - \lambda w \frac{2u(wu^2 + \theta_0 v + T) - 2wu^3}{(wu^2 + \theta_0 v + T)^2} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial v} = \lambda w u^2 \frac{\theta_0}{(wu^2 + \theta_0 v + T)^2} - 1 = 0. \end{cases}$$

Решение этой системы записывается в виде

$$u^* = q \frac{2\sqrt{\lambda w \theta_0} - c \theta_0}{2wq - \theta_0 r}, \quad v^* = \frac{q}{2} \frac{2\sqrt{\lambda w p} - cp}{2wq - pr} \left(c - r \frac{2\sqrt{\lambda w p} - cp}{2wq - pr} \right) - \frac{T}{p}.$$

Для выполнения условий максимума (3)-(5) должны выполняться условия $2qw - \theta_0 r < 0$ и $2\sqrt{\lambda w \theta_0} - c \theta_0 < 0$. Нетрудно видеть,

$$\text{что } \frac{\partial u^*}{\partial \lambda} = q \frac{\sqrt{w \theta_0}}{\sqrt{\lambda} (2qw - \theta_0 r)} < 0, \text{ и, соответственно,}$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial \lambda} = \frac{\sqrt{w \theta_0}}{\sqrt{\lambda}} q \frac{2cwq - 4r\sqrt{\lambda w \theta_0} + rc\theta_0}{2(2wq - \theta_0 r)^2}.$$

Из последнего выражения видно, что

$$(14) \quad \frac{\partial v}{\partial \lambda} > 0, \text{ если } \lambda < \frac{(2wq + r\theta_0)^2 c^2}{16r^2 w \theta_0},$$

$$\frac{\partial v}{\partial \lambda} < 0, \text{ если } \lambda > \frac{(2wq + r\theta_0)^2 c^2}{16r^2 w \theta_0}.$$

То есть существует такое значение цены, при котором объем средств, направляемых предприятием на поддержание уровня безопасности, оказывается максимальным.

Для значений параметров r, q, c, w, θ_0 и T , приведенных в предыдущем разделе, графики изменения объема выпуска и размера средств на поддержание уровня безопасности в зависимости от цены за риск представлены на Рис. 27 и Рис. 28.

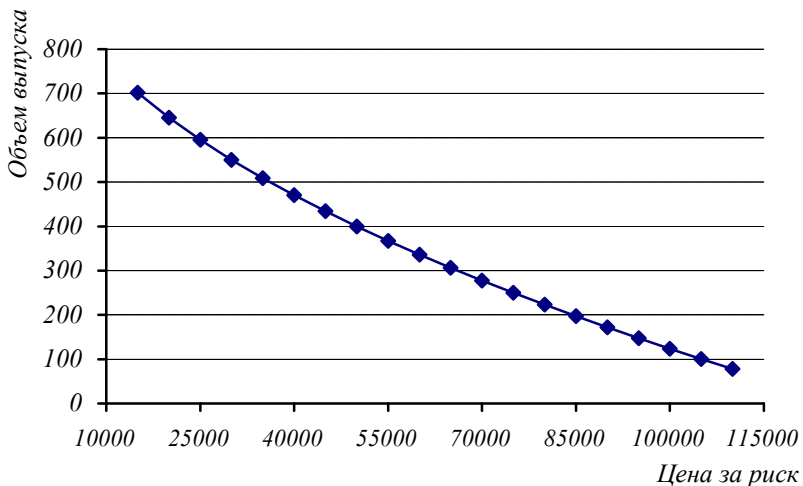


Рис. 27. Изменение объема выпуска в зависимости от цены за риск

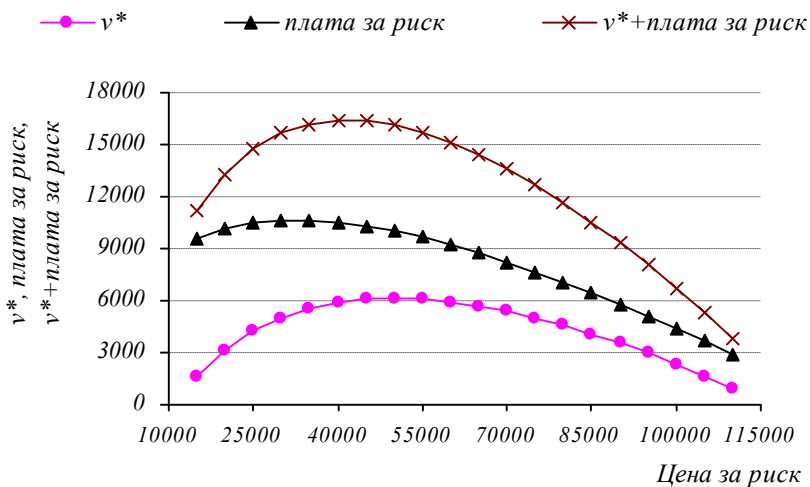


Рис. 28. Изменение средств на поддержание уровня безопасности в зависимости от цены за риск

Из выражения (14) и Рис. 28 видно, что максимальный объем средств, направляемых на снижение уровня риска, предприятие направляет при цене за риск, равной 50000. На Рис. 29 представлена зависимость изменения прибыли предприятия от цены за риск.

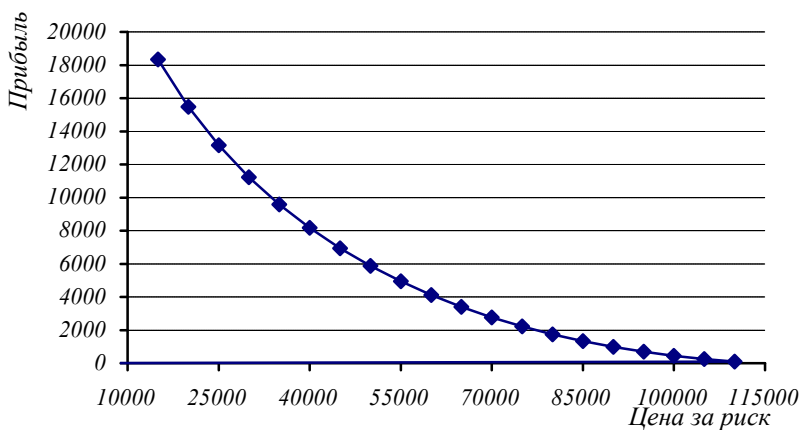


Рис. 29. Изменение прибыли в зависимости от цены за риск

Анализ показывает, что в данном примере предприятию при действии механизма платы за риск следует прекращать выпуск продукции, если цена за риск больше 114518, в противном случае производственная деятельность принесет предприятию только убытки.

И, наконец, на Рис. 30 представлена зависимость изменения уровня риска, связанного с деятельностью предприятия, в зависимости от установленной цены за риск.

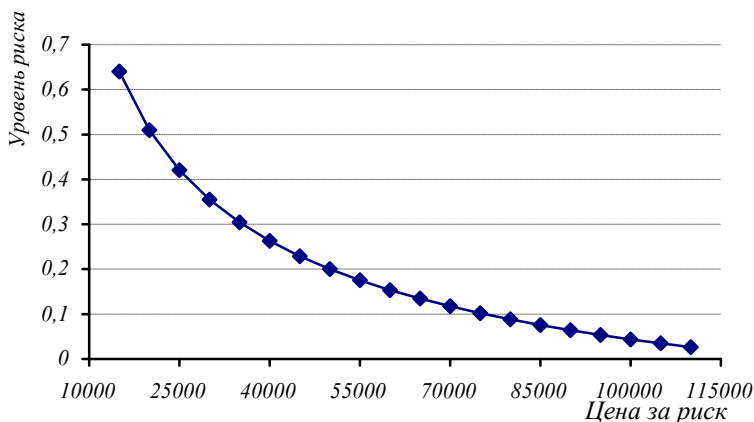


Рис. 30. Изменение уровня риска в зависимости от цены за риск

Напомним, что при установленной цене за риск предприятие выбирает такие u^* и v^* , чтобы получить максимум своей прибыли. Для цены за риск равной 114518 предприятие выпускает продукцию в объеме $u^* = 58$ единиц, тратит средств на поддержание уровня безопасности в размере $v^* = 276,8$. Уровень риска при этом составляет 0,0192, а прибыль предприятия равна нулю.

2.3. МЕХАНИЗМЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА

Собственные средства на снижение уровня риска предприятие выделяет в том случае, когда в регионе осуществляется контроль уровня риска (например, в виде штрафов или платы за риск), если же такого контроля нет, то у предприятия нет экономических стимулов

отвлекать собственные средства на снижение уровня риска. Более того, даже если предприятия получают дополнительные средства на снижение уровня риска, эффективность использования этих средств будет выше, если на предприятии осуществляется контроль уровня риска [2]. Поэтому в дальнейшем будем считать, что на предприятии действует механизм сильных штрафов, то есть для максимизации своей прибыли на предприятии решается задача¹⁷ (2.1.12).

Механизмы финансирования мероприятий по снижению уровня риска основываются на распределении средств централизованного фонда. Предположим, из центра предприятию выделено V единиц средств на снижение уровня риска, и на предприятии действует механизм сильных штрафов, тогда легко показать, что при максимизации своей прибыли предприятие уменьшает размер собственных средств на снижение уровня риска на величину V .

Действительно, пусть u' и v' – решение задачи (2.1.12), то есть u' – оптимальный объем выпуска, а v' – оптимальный объем средств, направляемый предприятием на снижение уровня риска.

Если предприятие получило V единиц средств на снижение уровня риска, то для максимизации своей прибыли оно будет решать задачу

$$(1) \begin{cases} c - \frac{dz(u)}{du} - \frac{\omega'(u)\theta(v+V)}{\omega(u)\theta'(v+V)} = 0, \\ \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(v+V)} - x = 0. \end{cases}$$

Обозначим $\tilde{v} = v + V$, тогда (1) можно представить в виде

$$(2) \begin{cases} c - \frac{dz(u)}{du} - \frac{\omega'(u)\theta(\tilde{v})}{\omega(u)\theta'(\tilde{v})} = 0, \\ \frac{\omega(u)}{\omega(u) + \theta(\tilde{v})} - x = 0. \end{cases}$$

Пусть u'' и \tilde{v}'' – решение этой задачи.

Сравнивая систему (2.1.12) и (2), легко видеть, что $u'' = u'$ и $\tilde{v}'' = v'$, но $\tilde{v}'' = v'' + V$, поэтому $v'' = v' - V$.

¹⁷ При ссылке на формулу другого раздела используется тройная нумерация, включающая номер главы, номер раздела и номер формулы.

То есть, объем средств, направляемых предприятием на снижение риска, уменьшился на величину V .

2.4. МЕХАНИЗМЫ КОМПЕНСАЦИИ ЗАТРАТ НА СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ РИСКА

Механизм компенсации затрат предполагает компенсацию предприятию всех или части потраченных средств на снижение уровня риска. При действии этого механизма центр заранее объявляет, какую часть потраченных предприятием средств он компенсирует из централизованного фонда. Как и в предыдущем разделе, будем считать, что собственные средства на снижение уровня риска предприятие выделяет в том случае, когда в регионе осуществляется контроль уровня риска. Так, если центр компенсирует $(1 - b)$ -ю часть средств, израсходованных предприятием, то при действии механизма компенсации затрат прибыль предприятия будет определяться выражением

$$(1) f = cu - z(u) - \lambda y(u, v) - b v.$$

Например, если $b = 1$, то все средства на снижение уровня риска выделяет предприятие, то есть центр не компенсирует ничего. Если $b = 0$, то все потраченные средства компенсируются центром. В дальнейшем будем считать, что $0 < b < 1$.

Утверждение 2.6. Чем бóльшая часть средств, потраченных предприятием на снижение уровня риска, компенсируется центром, тем больше средств выделяет предприятие на снижение уровня риска.

Доказательство утверждения 2.6. Если прибыль предприятия определяется выражением (1), то для максимизации своей прибыли предприятие решает задачу

$$(2) \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial u} = c - \frac{dz(u)}{du} - \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial v} = -\lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} - b = 0. \end{cases}$$

Пусть u_b и v_b – решение задачи (2). Тогда надо показать, что, если уменьшается b , то v_b увеличивается.

Аналогично выражению (2.2.6) можно записать

$$\begin{cases} \tilde{F}(b, u, v) = c - \frac{dz(u)}{du} - \lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} = 0, \\ \overline{\Phi}(b, u, v) = -\lambda \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} - b = 0. \end{cases}$$

Производная функции v_b в этом случае записывается в виде $\frac{dv_b}{db} = \frac{\tilde{F}'_b \overline{\Phi}'_u - \tilde{F}'_u \overline{\Phi}'_b}{\tilde{F}'_u \overline{\Phi}'_v - \tilde{F}'_v \overline{\Phi}'_u}$. Так как $\tilde{F}'_b = 0$ и $\overline{\Phi}'_b = -1$, то, учитывая (2.2.8), можно записать

$$\frac{dv_b}{db} = - \frac{\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2}}{\left(\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} \right) \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2} - \lambda \left[\frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} \right]^2}.$$

Из (2.2.3) и (2.2.4) следует, что числитель и знаменатель этой дроби положительны. Утверждение 2.6 доказано.

Следствие 1. Если справедливо (2.1.9), то увеличение или уменьшение u_b в зависимости от b определяется знаком разности $\omega(u_b) - \theta(v_b)$. То есть, если $\omega(u_b) - \theta(v_b) > 0$, то объем выпуска с уменьшением b падает. А если $\omega(u_b) - \theta(v_b) < 0$, то объем выпуска с уменьшением b растет.

Производная функции u_b записывается как

$$\frac{du_b}{db} = \frac{\tilde{F}'_v \overline{\Phi}'_b - \tilde{F}'_b \overline{\Phi}'_v}{\tilde{F}'_u \overline{\Phi}'_v - \tilde{F}'_v \overline{\Phi}'_u}.$$

Учитывая (2.2.8), это выражение можно переписать в виде

$$\frac{du_b}{db} = \frac{\lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v}}{\left(\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} \right) \frac{\partial^2 x(u, v)}{\partial v^2} - \lambda \left[\frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} \right]^2}.$$

Знаменатель этой дроби положителен, а числитель, учитывая (2.2.10), можно переписать в виде

$$\lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} = \lambda \omega'(u) \theta'(v) \frac{\omega(u) - \theta(v)}{[\omega(u) + \theta(v)]^3}.$$

Таким образом, знак производной $\frac{du_b}{db}$ определяется разностью $\omega(u_b) - \theta(v_b)$.

Следствие 2. Если справедливо (2.1.9), то возможна ситуация, когда с увеличением процента компенсации затрат уровень риска на предприятии увеличивается.

Другими словами, возможна ситуация, когда

$$(3) \frac{dx(u_b, v_b)}{db} < 0.$$

Производную функции $y(u_b, v_b)$ можно записать как

$$\frac{dy(u_b, v_b)}{db} = \frac{\omega' \theta \frac{du_b}{db} - \omega \theta' \frac{dv_b}{db}}{(\omega + \theta)^2}.$$

Подставив сюда выражения для $\frac{du_b}{db}$ и $\frac{dv_b}{db}$, получим

$$\frac{dy(u_b, v_b)}{db} = \frac{\theta'}{(\omega + \theta)^2} \frac{\lambda \theta \frac{\omega \omega'' - [\omega']^2}{[\omega + \theta]^2} + \omega \frac{d^2 z(u)}{du^2}}{\left(\frac{d^2 z(u)}{du^2} + \lambda \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u^2} \right) \frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial v^2} - \lambda \left[\frac{\partial^2 y(u, v)}{\partial u \partial v} \right]^2}.$$

Выше было показано, что знаменатель этой дроби положительный и имеет место (2.2.12). Поэтому можно утверждать, что возможна ситуация, когда (3) выполняется.

Пусть справедливы зависимости (2.1.19) и (2.1.20). Тогда систему уравнений (2) можно переписать в виде

$$\begin{cases} c - \frac{r}{q}u - \lambda w \frac{2u(wu^2 + \theta_0 v + T) - 2wu^3}{(wu^2 + \theta_0 v + T)^2} = 0, \\ \lambda w u^2 \frac{\theta_0}{(wu^2 + \theta_0 v + T)^2} - b = 0. \end{cases}$$

Решение этой системы записывается в виде

$$u_b = q \frac{2\sqrt{\lambda b w \theta_0} - c \theta_0}{2b w q - \theta_0 r}, \quad v_b = \frac{1}{2b} u_b \left(c - \frac{r}{q} u_b \right) - \frac{T}{\theta_0}.$$

Если $b \rightarrow 0$, что соответствует случаю, когда центр компенсирует все расходы предприятия, то при этом получаем $u_b \xrightarrow{b \rightarrow 0} \frac{cq}{r}$, и, соответственно, $v_b \xrightarrow{b \rightarrow 0} \infty$.

Таким образом, при любой цене $\lambda > 0$, если центр компенсирует все расходы предприятия на снижение риска, то эти расходы будут возрастать, а объем выпуска продукции будет стремиться к величине, соответствующей объему выпуска при отсутствии контроля за уровнем риска.

Для того чтобы узнать, как изменяется объем выпуска продукции на предприятии при изменении процента компенсации, определим знак производной

$$\frac{\partial u_b}{\partial b} = q \sqrt{\frac{w\theta_0}{b}} \frac{2qc\sqrt{w\theta_0 b} - \sqrt{\lambda}\theta_0 r - 2wqb\sqrt{\lambda}}{(2bwq - \theta_0 r)^2}.$$

Отсюда следует, что $\frac{du_b}{db} > 0$, когда

$$\theta_0 \frac{c^2 q - r\lambda - c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda}}{2qw\lambda} < b < \theta_0 \frac{c^2 q - r\lambda + c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda}}{2qw\lambda}.$$

Легко показать, что при любом $\lambda < \frac{qc^2}{2r}$ справедливо

$$c^2 q - r\lambda - c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda} > 0.$$

А это значит, что для b , удовлетворяющих неравенству

$$0 < b < \theta_0 \frac{c^2 q - r\lambda - c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda}}{2qw\lambda},$$

$\frac{du_b}{db} < 0$, и соответственно объем выпуска падает с ростом процента компенсации затрат. А при

$$(4) b > \theta_0 \frac{c^2 q - r\lambda - c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda}}{2qw\lambda}$$

$\frac{du_b}{db} > 0$, и объем выпуска увеличивается с ростом процента компенсации затрат. Для того чтобы выполнялось неравенство (4), должно выполняться условие $\theta_0 \frac{c^2 q - r\lambda - c\sqrt{q^2 c^2 - 2qr\lambda}}{2qw\lambda} < 1$.

А это неравенство справедливо, когда

$$(5) \lambda < \frac{4c^2\theta_0 q^2 w}{(r\theta_0 + 2qw)^2}.$$

Таким образом, если выполняется неравенство

$$(6) \lambda > \frac{4c^2\theta_0 q^2 w}{(r\theta_0 + 2qw)^2}$$

и справедливо (4), объем выпуска увеличивается с ростом процента компенсации затрат.

При рассматриваемых зависимостях уровень риска на предприятии может быть представлен в виде

$$(7) y(u_b, v_b) = u_b \sqrt{\frac{bw}{\lambda\theta_0}}.$$

Выше отмечалось, что возможна ситуация, когда с увеличением процента компенсации затрат увеличивается и уровень риска на предприятии. Выражение (3) для (7) можно переписать в виде

$$\frac{dy(u_b, v_b)}{db} = q \sqrt{\frac{\theta_0 w}{\lambda}} \frac{2cwqb - 4r\sqrt{\lambda w\theta_0 b} + c\theta_0 r}{2\sqrt{b}(2bwq - \theta_0 r)^2} < 0.$$

Отсюда следует, что уровень риска возрастает с ростом процента компенсации когда

$$\theta_0 r \frac{4r\lambda - 2\sqrt{2r\lambda(2r\lambda - c^2 q)} - c^2 q}{2c^2 wq^2} < b < \theta_0 r \frac{4r\lambda + 2\sqrt{2r\lambda(2r\lambda - c^2 q)} - c^2 q}{2c^2 wq^2}.$$

$$\text{Легко показать, что } 0 < \theta_0 r \frac{4r\lambda - 2\sqrt{2r\lambda(2r\lambda - c^2 q)} - c^2 q}{2c^2 wq^2} < 1.$$

При $\lambda > \frac{c^2(2wq + \theta_0 r)^2}{16\theta_0 r^2 w}$, и при этом всегда выполняется неравенство

$$\theta_0 r \frac{4r\lambda + 2\sqrt{2r\lambda(2r\lambda - c^2 q)} - c^2 q}{2c^2 wq^2} > 1.$$

Для значений параметров r, q, c, w, θ_0 и T , приведенных в разделе 2.2, графики изменения объема выпуска в зависимости от значения b при ценах (ставках платы за риск), удовлетворяющих неравенствам (5) и (6) представлены на Рис. 31.

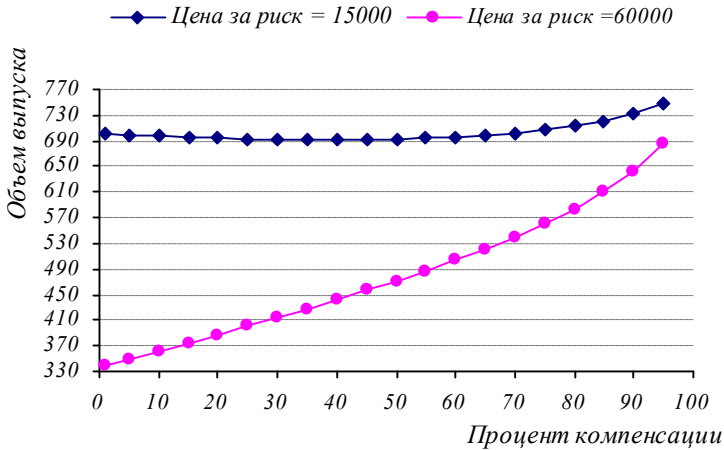


Рис. 31. Изменение объема выпуска в зависимости от процента компенсации

Из выражения (4) и Рис. 31 видно, что при $\lambda = 15000$ предприятие выпускает минимальный объем продукции когда центр компенсирует 37 % расходов предприятия на снижение уровня риска. Расходы предприятия на снижение уровня риска для этих значений цен изменяются так, как показано на Рис. 32. Из приведенных графиков видно, что разница в затратах на снижение уровня риска при различных ценах за риск по мере увеличения процента компенсации затрат увеличивается.

Обозначим через $v_{b\lambda_1}$ и $v_{b\lambda_2}$ затраты при различных ценах за риск. Тогда $\Delta v_b = v_{b\lambda_1} - v_{b\lambda_2} = \frac{u_{b\lambda_1} - u_{b\lambda_2}}{2b} \left[c - \frac{r}{q} (u_{b\lambda_1} + u_{b\lambda_2}) \right]$. Подставив значения $u_{b\lambda_1}$ и $u_{b\lambda_2}$, получим

$$\Delta v_b = q\sqrt{w\theta_0} \frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{b}(2bwq - \theta_0 r)} \frac{2cbwq + \theta_0 cr - 2r\sqrt{bw\theta_0}(\sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2})}{2cbwq - \theta_0 cr}.$$

На Рис. 34 представлены графики изменения уровня риска в зависимости от b .

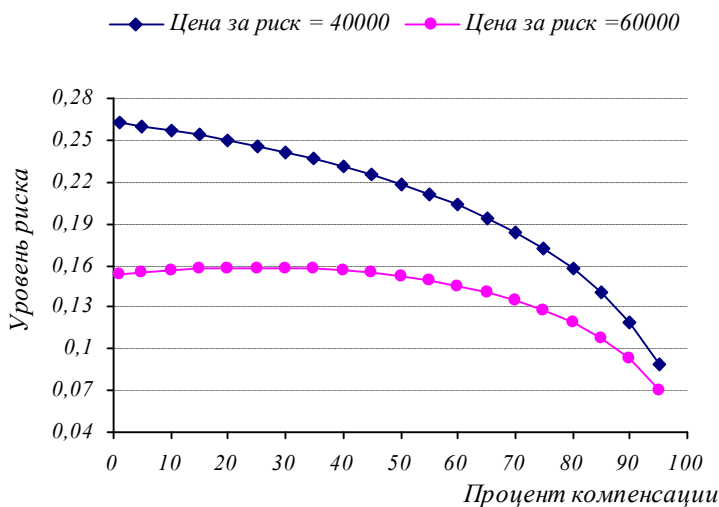


Рис. 34. Изменение уровня риска для разных цен в зависимости от процента компенсации

Выше было показано, что возможна ситуация, когда с ростом процента компенсации затрат на снижение уровня риска происходит увеличение уровня риска на предприятии. Именно этот случай показан на Рис. 34 для цены за риск $\lambda = 60000$. При увеличении процента компенсации до 25 происходит увеличение уровня риска, в то время как расходы предприятия на снижение уровня риска растут (как показано на Рис. 32).

Рисунки Рис. 33 и Рис. 34 показывают, что механизм компенсации может обеспечить достаточно низкий уровень риска, если в распоряжении центра имеется достаточное количество средств. Это связано с тем, что на снижение уровня риска главным образом используются средства центра.

Все выводы этого раздела были получены в предположении, что возможности центра безграничны, и он в состоянии осуществить компенсацию любых потраченных предприятием средств. Но если учесть, что средства центра ограничены некоторой величиной R_0 , то при действии механизма компенсации центр должен объявить, что он компенсирует $(1 - b)$ -ю часть средств, израсходованных предприятием, но не более чем R_0 .

Имея такую информацию, предприятие теперь должно сравнить $(1 - b) v_b$, где v_b – решение задачи (2), с величиной R_0 . Если окажется, что

$$(8) (1 - b) v_b \leq R_0,$$

то объем выпуска продукции и размер средств, направляемых на снижение уровня риска, определяется из решения системы (2). Если же (8) не выполняется, то размер средств, направляемых предприятием на снижение уровня риска, определяется из условия

$$v'_b = \frac{R_0}{1 - b},$$

а объем выпуска продукции из решения задачи

$$f(u, v'_b) = cu - z(u) - \lambda x(u, v'_b) - bv'_b \rightarrow \max_{u \geq 0}.$$

На Рис. 35 представлены графики изменения затрат на снижение уровня риска при цене за риск $\lambda = 60000$ и $\lambda = 20000$. Средства центра ограничены величиной $R_0 = 4000$. Отсюда видно, что при цене за риск $\lambda = 60000$ центр может осуществлять компенсировать 36,5% затрат предприятия, а при $\lambda = 20000$ – 51,5%.

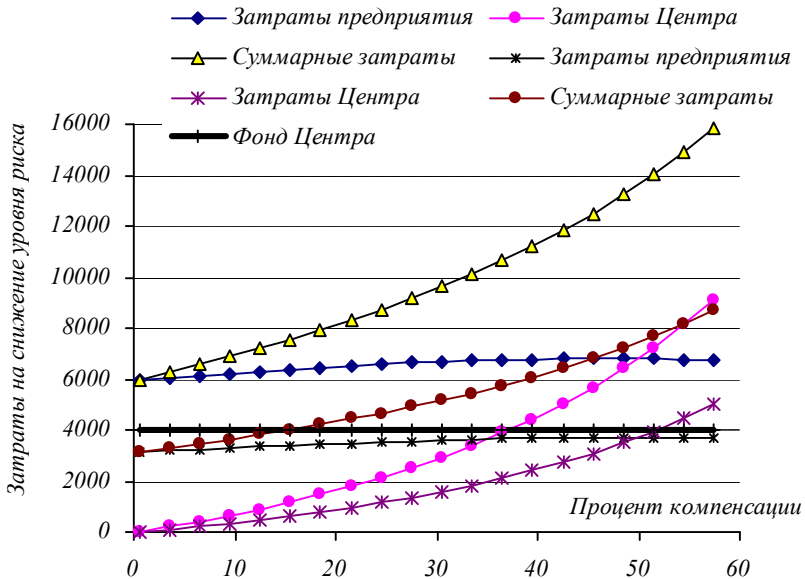


Рис. 35. Изменение затрат на снижение уровня риска в зависимости от процента компенсации

Более того, как следует из Рис. 35, начиная с некоторого момента собственные расходы предприятия на снижение уровня риска падают.

2.5. МЕХАНИЗМЫ СТРАХОВАНИЯ

Страхованием называется «система мероприятий по созданию денежного (страхового) фонда за счет взносов его участников, из средств которого возмещается ущерб, причиненный стихийными бедствиями, несчастными случаями, а также выплачиваются иные денежные суммы в связи с наступлением определенных событий» [128, С. 1280].

Экологическое страхование. В зарубежной практике (см. обзор в [23]) под *экологическим страхованием* понимается «страхование гражданско-правовой ответственности владельцев потенциально опасных объектов ... в связи с необходимостью возмещения ущерба третьим лицам, обусловленного технологической аварией или катастрофой». В отечественной литературе используется более широкое определение [88]: «страхование ответственности предприятий-источников повышенной экологической опасности и имущественных интересов страхователей, возникающих в результате аварийного (внезапного, непреднамеренного) загрязнения окружающей природной среды, обеспечивающее возможность компенсации части причиняемых загрязнением окружающей среды убытков и создающее дополнительные источники финансирования природоохранных мероприятий». Целью экологического страхования является обеспечение страховой защиты материальных интересов физических и юридических лиц в виде полной или частичной компенсации убытков, причиняемых загрязнением окружающей среды, вызванным авариями, технологическими сбоями или стихийными бедствиями [11, 70].

На настоящее время в российской экономике виновники причиненных убытков и ущербов не несут практически никакой ответственности – в [88] отмечается, что ранее возмещение ущерба осуществлялось примерно на 10 % за счет государства, на 2-5 % – виновниками ущерба, а оставшаяся часть не покрывалась вовсе. С другой стороны, размер ущерба от отдельных техногенных катастроф зачастую бывает настолько велик, что его даже частичное возмещение не под силу виновнику. Поэтому существенную роль могут

и должны играть механизмы страхования¹⁸, перераспределяющие крупные риски и позволяющие в большей степени возмещать экологический и другие виды ущерба, причиняемые как природе, так и экономическим объектам и отдельным субъектам.

При этом необходимо принимать во внимание возможность вовлечения в природоохранную деятельность коммерческих структур. Единственным побуждающим их к подобной деятельности фактором может служить экономическая выгода. На этом этапе существенной становится роль государства, которое с помощью законодательных и экономических рычагов (см. описание механизмов смешанного страхования ниже) должно способствовать развитию механизмов природоохранной деятельности, в том числе – механизмов страхования.

Помимо роли государства, чрезвычайно важным, особенно в современных условиях, когда в ближайшей перспективе не ожидается введения единых институтов экологической ответственности¹⁹, является развитие и расширение использования механизмов управления безопасностью в широком смысле и механизмов экологического страхования как их существенной составляющей.

Значительную роль для успеха внедрения экологического страхования играет национальный менталитет. «В американской судебной системе возмещение ущерба определяется через анализ вины и непосредственной причины нанесения ущерба. Стандартом для определения вины является доктрина «благоразумно осторожного человека»: в случае, когда действия конкретного человека выразились в нанесении кому-либо ущерба, но сам человек был в достаточ-

¹⁸ Механизмы страхования снижают ожидаемое экономическое бремя по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Для успешной реализации программ страхования необходима не только соответствующая законодательная их поддержка, но и, в первую очередь, законодательная поддержка экономической и юридической ответственности за экологические риски. В том числе, принципиально важна персонафикация причинителя вреда и реципиента.

¹⁹ Примерами таких возможных институтов могут являться налоги на природоохранную деятельность, совершенствование служб экологического мониторинга, создание правовой базы, обеспечивающей существенное изменение отношения хозяйствующих субъектов к природоохранной деятельности и т.д. Роль государства заключается также и в том, что экологическое страхование, осуществляемое в виде имущественного страхования, может рассматриваться как элемент обеспечения безопасности лишь при условии, что оно не поощряет экологическую безответственность страхователя (например, путем безусловной компенсации его убытков).

ной мере благоразумен и не нарушал закона, он не несет финансовую ответственность за нанесенный ущерб» [1, с. 61]. То есть, в сознании американцев страхование напрямую ассоциируется с качеством жизни и является синонимом ее безопасности. В то же время, в России соответствующая экономическая культура находится еще в стадии становления. С этой точки зрения актуальна соответствующая адаптация законодательной базы и развитие системы аварийного комиссарства.

Специфика экологического страхования заключается, в том числе, в том, что в нем величина страховой суммы складывается из двух составляющих²⁰.

1. Затраты на предупреждение аварийного загрязнения. Для страхователя они представляют собой дополнительные и неоправданные (в случае отсутствия экологической аварии) расходы. Страхователь традиционно полагает, что доход от невнедрения природоохранных мероприятий больше, чем от внедрения. Для общества и третьих лиц, в чью пользу заключается договор страхования ответственности за аварийное загрязнение среды, эти затраты – составная часть потенциальных убытков. Осознавая это и оценивая возможное страховое возмещение, страховщик либо сам выделяет средства на предупреждение аварий, либо экономически стимулирует страхователя осуществить природоохранные мероприятия (см. примеры соответствующих механизмов выше). Они могут быть либо осуществлены, либо учтены в расчете страховой суммы (и, следовательно, страховой ставки).

2. Вторая составляющая страховой суммы – убытки, возникающие из-за воздействия на реципиентов поступивших в окружающую среду вредных веществ. В отличие от первого вида убытков, они непосредственно проявляются и у третьих лиц.

Классификация убытков может быть произведена следующим образом. Убытки, возмещаемые по страхованию ответственности на случай загрязнения окружающей среды, зарубежными страховщиками, как правило, подразделяются на две группы: прямые убытки (телесные повреждения, болезни, психические расстройства, ущерб, причиняемый сельскохозяйственным и водным культурам, лесам и

²⁰ Другими словами, в экологическом страховании *брутто-ставка* определяется суммой *нетто-ставки*, *коммерческой* и *рисковой надбавок* (нагрузок), а также *нагрузки*, отражающей затраты на проведение предупредительных мероприятий.

недвижимой собственности) и косвенные убытки (увеличение расходов и потеря доходов, вызванные простоем производства, ущерб от загрязнения мест обитания рыбы, территорий, предназначенных для отдыха и развлечений и т.д.). Косвенные убытки включают также расходы на очистку и удаление отходов, затраты, связанные с несчастными случаями, вызванными загрязнением окружающей среды, и т.д.

В качестве основных *функций экологического страхования* можно выделить, во-первых, компенсацию убытков, возникающих в результате загрязнения окружающей среды (в том числе и при невозможности полного подавления выбросов/сбросов вредных веществ). Страховое возмещение в экологическом страховании покрывает, прежде всего, претензии третьих лиц, уменьшая тем самым издержки страхователей, но в определенных условиях и при дифференцированных тарифных ставках возмещению подлежат и убытки самих страхователей, образующиеся в результате непреднамеренного аварийного загрязнения окружающей среды. Во-вторых, экологическое страхование способно дать гарантии пострадавшим в получении ими причитающегося по закону возмещения независимо от финансового положения причинителя вреда, что чрезвычайно важно в современных российских условиях, особенно с точки зрения формирования правовой культуры и развития экологического судопроизводства. В-третьих, экологическое страхование может осуществлять функции мониторинга и контроля за осуществлением предприятиями мер по обеспечению экологической безопасности на всех этапах прохождения договора страхования. Четвертой функцией экологического страхования является создание источников дополнительного финансирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности (например, за счет отчисления части страховой премии на предупредительные мероприятия).

Механизмы смешанного страхования. В [28] был введен класс механизмов смешанного финансирования и кредитования, которые основываются на следующей идее. Если некоторая группа проектов является экономически невыгодной с точки зрения реализации их коммерческими фирмами, но осуществление этой группы проектов необходимо для общества (примерами таких проектов являются: социальная защита, охрана окружающей среды и др.), интересы которого представляет государство или какой-либо другой социальный и/или экономический институт (далее в настоящем разделе для его обозначения будем использовать термин «центр»), обладающий

соответствующими ресурсами, то возможно совместное (смешанное) финансирование проектов за счет средств фирм и бюджета центра.

Механизмом смешанного финансирования называется правило определения взносов каждого из «инвесторов» на основании имеющейся (и, зачастую, сообщаемой самими инвесторами) информации. Это правило должно быть гибким, так как при фиксации доли каждого из инвесторов может сложиться ситуация, в которой либо желающих вложить собственные средства будет слишком мало и/или эффективность использования средств центра будет низка. В [28] описан гибкий механизм смешанного финансирования, который обладает свойством привлечения инвестиций в приоритетные проекты.

Используем идею смешанного финансирования в экологическом страховании следующим образом – рассмотрим модель экологического страхования, в которой возможно привлечение ресурсов центра [25, 94]. Задача заключается в определении *механизма смешанного экологического страхования* (то есть принципа взаимодействия участников, использующего как ресурсы страхователей – предприятий, так и ресурсы страховщика – центра²¹), который обладал бы определенными свойствами, такими как, например, *неманипулируемость* (свойство, заключающееся в выгоды для участников системы сообщения достоверной информации), и приводил к эффективному (в смысле управления агрегированным риском) распределению собираемых страховых взносов и выплачиваемых возмещений.

²¹ *Содержательной интерпретацией смешанного экологического страхования является взаимодействия администрации региона (центра), заинтересованной в минимизации потерь от ЧС и загрязнения окружающей среды предприятиями-источниками загрязнения (страхователями). Предприятия могут создать фонд взаимного страхования, а администрация региона может гарантировать определенное возмещение потерь (из своих фондов) страхователю при наступлении у него страхового случая (например, компенсировать ему часть затрат на природоохранные и природовосстановительные мероприятия, компенсацию ущерба третьим лицам и т.д.).*

Пусть имеются n страхователей (предприятий) с целевыми функциями²²

$$Ef_i = \tilde{g}_i - \kappa_i + p_i [V_i - W_i], i \in Q,$$

где \tilde{g}_i – прибыль от хозяйственной деятельности страхователя, κ_i – страховой взнос, V_i – страховое возмещение, p_i – вероятность наступления страхового случая, W_i – потери (ущерб) при наступлении страхового случая, $Q = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество предприятий (страхователей). Предположим, что вероятности $\{p_i\}$ наступления страховых случаев не известны центру и страхователи сообщают ему оценки $\{s_i\}$ этих вероятностей.

Пусть у центра (страховщика) имеется страховой фонд R_0 и возмещение i -го страхователя $V_i(s)$, где $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ – вектор сообщений страхователей о соответствующих вероятностях наступления страховых случаев, определяется как часть $\alpha_0(s)$ его потерь W_i , которая может быть покрыта суммой страхового фонда центра и собранными взносами страхователей, то есть: $V_i(s) = \alpha_0(s) W_i, i \in Q$,

$$\alpha_0(s) = (W(s) + R_0) / W, \quad W(s) = \sum_{i \in Q} s_i W_i, \quad W = \sum_{i \in Q} p_i W_i.$$

Подставляя это выражение в целевую функцию страхователя и вычисляя производную по его сообщению, получаем, что

$$\frac{\partial Ef_i}{\partial s_i} \approx \frac{p_i W_i}{W} - 1 \leq 0, i \in Q,$$

то есть такой механизм смешанного страхования оказывается манипулируемым. Содержательно, страхователи полностью используют фонд центра, сообщая, тем не менее, минимальные оценки вероятности наступления страхового случая.

Выходом может служить установление зависимости между долей фонда центра, получаемой страхователем (в том или ином виде), и сообщениями последнего. В идеале хотелось бы сделать эту долю

²² Для простоты ограничимся описанием взаимодействия страхователей в течение одного промежутка времени, на протяжении которого однократно производится сбор взносов и компенсация ущербов. При этом будем считать, что остатки резервов (разность между собранными взносами и произведенными выплатами) если они положительны, используются в качестве резерва в следующем периоде времени (учет альтернативных способов использования остатков, например, инвестиция их в те или иные проекты, может быть «автоматически» учтен в рамках описываемой ниже модели, поэтому акцентов на задачах управления инвестициями не делается).

монотонной по сообщениям страхователей, что, быть может, побуждало бы их к некоторому увеличению заявок в процессе конкуренции за ресурс центра. Однако легко убедиться, что, так как вероятности наступления страхового случая априори неизвестны, а механизм должен быть таков, чтобы при любых сообщениях страхователей имело место балансовое ограничение (сумма взносов страхователей и фонда центра должна равняться сумме ожидаемых возмещений), то, например, установить «надбавку», выплачиваемую страхователю из фонда центра, пропорциональной сообщенным им ожидаемым потерям, невозможно. Поэтому рассмотрим другой механизм, в котором центр из своего фонда компенсирует страхователям часть их страховых взносов, причем компенсируемая доля зависит от сообщений страхователей о вероятностях наступления страхового случая. Компенсируемая центром часть страхового взноса может интерпретироваться как установленная им скидка, поэтому соответствующий механизм был условно назван «механизмом скидок» [23].

Механизм скидок. Пусть центр из своего страхового фонда R_0 компенсирует i -му страхователю часть $V_i(s)$ его страхового взноса $s_i W_i$, то есть

$$(1) \kappa_i(s) = s_i W_i - V_i(s), \quad i \in Q,$$

где размер компенсации определяется на основании принципа прямых приоритетов, то есть

$$(2) V_i(s) = \frac{s_i W_i}{W(s)} R_0, \quad i \in Q.$$

Легко видеть, что, если²³ $V_i(s) = W(s) W_i / W$, $i \in Q$, то балансовые условия имеют вид:

$$(3) \forall s \sum_{i \in Q} V_i(s) = R_0, \quad \kappa(s) = W(s), \quad \sum_{i \in Q} p_i V_i(s) = \kappa(s).$$

Ожидаемое значение целевой функции i -го страхователя имеет вид:

$$(4) E f_i(s) = \tilde{g}_i - s_i W_i + \frac{s_i W_i}{W(s)} R_0 + p_i Q_i [W(s) / W - 1], \quad i \in Q.$$

Найдем равновесие Нэша s^* игры страхователей. Для этого, обозначив

²³ Отметим, что данное выражение определяет зависимость страхового возмещения страхователя в том числе от ожидаемых суммарных потерь, которые «наблюдаемы» после наступления страховых случаев.

$$(5) \beta'_i = 1 - \frac{p_i W_i}{W},$$

определим из условий $\frac{\partial Ef_i}{\partial s_i} = 0, i \in Q$, сообщения, доставляющие максимумы ожидаемым полезностям страхователей. Для этого рассмотрим систему уравнений:

$$(6) R_0 \frac{W(s) - s_i W_i}{W^2(s)} = \beta'_i, i \in Q.$$

Складывая n уравнений, получим $W(s) = (n - 1) R_0 / \beta'$, где $\beta' = \sum_{i \in Q} \beta'_i$. Подставляя (5), имеем:

$$(7) W(s) = R_0.$$

Подставляя (7) в (6), получаем:

$$(8) s_i^* = p_i R_0 / W, i \in Q.$$

Итак, выражение (8) описывает равновесие Нэша. Более того, оно является допустимым равновесием, так как все равновесные сообщения страхователей неотрицательны и обеспечивают страхователям не меньшее значение ожидаемой полезности, чем при неучастии в смешанном страховании (последнее утверждение легко проверяется сравнением $s_i W_i - \frac{s_i W_i}{W(s)} R_0 - p_i W_i [W(s) / W - 1]$ и $p_i W_i$).

Подставляя (8) в (1) и (2), получаем:

$$(9) \kappa_i(s^*) = 0, i \in Q,$$

$$(10) V_i(s^*) = \frac{p_i W_i}{W} R_0, i \in Q.$$

Утверждение 2.7. Механизм скидок обладает следующими свойствами:

- а) суммарный страховой взнос равен страховому фонду центра;
- б) компенсация осуществляется пропорционально истинным ожидаемым потерям страхователей;
- в) при страховом фонде центра, равном суммарным ожидаемым потерям страхователей, равновесие Нэша соответствует сообщению достоверной информации;
- г) для любого механизма скидок существует эквивалентный прямой (неманипулируемый) механизм.

Доказательство утверждения 2.7. Справедливость пункта а) следует из (7), б) – из (10), в) – из (8). Поэтому остановимся на доказательстве пункта г).

Напомним, что если задан некоторый не прямой механизм планирования, в котором равновесные сообщения агентов зависят от их типов, то механизм, в котором агенты сообщают свои типы, а центр определяет планы, подставляя сообщения в равновесие непрямого механизма, называется соответствующим исходному прямому механизму [98]. Соответствующий прямой механизм, который *неманипулируем* (то есть является механизмом, в котором сообщение достоверной информации является доминантной стратегией каждого агента), называется эквивалентным прямым механизмом.

В соответствии с приведенными определениями исходным является механизм (2), а соответствующий ему прямой механизм $\hat{V}(\sigma')$, где $\sigma' = (\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_n)$ – вектор сообщений страхователей о вероятностях наступления страхового случая, определяется подстановкой (8) в (2), то есть:

$$s_i^*(\sigma') = \frac{\sigma'_i R_0}{\sum_{j \in Q} \sigma'_j W_j}, \quad i \in Q,$$

$$x_i^*(\sigma') = \frac{s_i^*(\sigma') W_i}{\sum_{j \in Q} s_j^*(\sigma') W_j} R_0 = \frac{\sigma'_i W_i}{\sum_{i \in Q} \sigma'_i W_i} R_0, \quad i \in Q,$$

причем $\forall \sigma' \quad W(s^*(\sigma')) = \sum_{i \in Q} s_i^*(\sigma') W_i = R_0$.

Подставляя последнее выражение в (4), получаем следующую зависимость ожидаемого выигрыша i -го страхователя от сообщений страхователей в прямом механизме:

$$\forall \sigma' \quad Ef_i(\sigma) = \tilde{g}_i + p_i W_i [R_0 / W - 1], \quad i \in Q.$$

Отсюда следует, что ожидаемые выигрыши страхователей в соответствующем механизму (2) прямом механизме $\hat{V}(\sigma')$ не зависят от их сообщений, следовательно, прямой механизм является неманипулируемым. Утверждение 2.7 доказано.

В заключение настоящего раздела остановимся на содержательной интерпретации свойств механизма скидок, устанавливаемых утверждением 2.7.

Так как суммарный страховой взнос в точности равен страховому фонду центра (в соответствии с (9) равновесные взносы страхователей равны нулю, то есть полностью компенсируются центром), то, конечно, нельзя сказать, что механизм скидок обладает свойством привлечения средств страхователей (фактически, центр безвозмездно страхует страхователей, рассчитывая в силу своей нейтральности к риску на ожидаемое страховое возмещение, равное своему страховому фонду). Тем не менее, механизм скидок обладает следующими привлекательными свойствами:

- он сбалансирован (см. условия (3) и (7));
- обеспечивает «справедливое» возмещение для страхователей – в силу (10) каждый страхователь получает компенсацию, пропорциональную своим истинным ожидаемым потерям, и, в силу этого, механизм скидок может рассматриваться как кандидат на эффективный механизм распределения ограниченных средств, выделенных на экологическое страхование;
- для него существует эквивалентный прямой механизм, в котором все страхователи сообщают центру достоверную информацию;
- в соответствии с (8), для любого размера страхового фонда центра, отношение равновесного сообщения страхователя к истинному значению вероятности наступления страхового случая одинаково для всех страхователей, что позволяет использовать механизмы косвенного оценивания этих параметров;
- так как ожидаемые взносы страхователей равны нулю, то центр имеет возможность распоряжаться ресурсом R_0 по своему усмотрению до конца рассматриваемого периода, и т.д.

2.6. МЕХАНИЗМЫ АУДИТА

Рассмотрим ЭкЭС, состоящую из одного центра (органа надзора) и одного предприятия [38]. Целевая функция центра

$$\Phi(\sigma, y) = H(y) - \sigma(y),$$

целевая функция предприятия (в которой его производственная деятельность не учитывается):

$$f(\sigma, y) = \sigma(y) - \varphi(y, r),$$

где y – выбираемый предприятием уровень безопасности (УБ); $y \geq 0$; $\varphi(y, r)$ – затраты предприятия на повышение и поддержание УБ – непрерывная неотрицательная неубывающая по y функция, равная нулю при нулевом уровне безопасности; $\sigma(y)$ – стимулирование

предприятия за высокий УБ; $H(y)$ – «доход» центра – непрерывная функция, $H(y) \geq 0$, $H(0) = 0$; $r \geq 0$ – тип предприятия – параметр, характеризующий используемые им технологии и эффективность его деятельности.

Порядок функционирования системы следующий: центр назначает систему стимулирования $\sigma(y)$, после чего предприятие выбирает УБ y , стремясь максимизировать свою целевую функцию.

Если центру достоверно не известен тип предприятия, то предприятие может предоставить центру недостоверную информацию $s \geq 0$ о своем типе, т.е. о затратах $\varphi(y, r)$ на природоохранные мероприятия. Пусть $\varphi'_r(y, r) \leq 0$, тогда предприятие будет сообщать центру оценку $s \leq r$. Содержательно это означает, что предприятие в сообщении центру будет занижать свой тип, завышая тем самым сообщаемые затраты на обеспечение УБ. Если центр использует принцип максимального гарантированного результата или просто верит сообщению предприятия, то, следуя принципу компенсации затрат (стимулирование должно в точности равняться сумме затрат предприятия и резервной полезности [98]), стимулирование предприятия со стороны центра при этом возрастает.

Будем считать, что центр назначает предприятию компенсаторную систему стимулирования [97], то есть вознаграждение компенсирует²⁴ затраты предприятия на обеспечение УБ только при условии обеспечения нормативного значения УБ x :

$$(1) \sigma(x, y, s) = \begin{cases} \varphi(x, s), & y \geq x \\ 0, & y < x \end{cases}.$$

При использовании системы стимулирования (1) сразу встает вопрос о неманипулируемости, то есть создании такой системы управления, при которой предприятию выгодно было бы сообщать центру свой действительный тип, то есть сообщать правду о затратах на обеспечение УБ.

Естественно, в интересах центра обнаружить искажение информации. Для достижения этой цели центр с вероятностью p_0 проводит аудит фиксированной стоимости \tilde{c} . Будем считать, что, если аудит проводится, то искажение предприятием информации $s \leq r$ о своем типе всегда обнаруживается, то есть в случае аудита центр наблюда-

²⁴ В соответствии с выражением (1) затраты агента компенсируются полностью. В случае частичной компенсации методы анализа механизмов аудита будут практически такими же.

ет истинный тип предприятия. В этом случае на предприятие налагается линейный штраф $\chi(r, s) = \mu (r - s)$.

Таким образом, ожидаемые значения целевых функций участников (центра и предприятия соответственно):

$$\begin{aligned}\Phi(\sigma, y) &= H(y) - \varphi(y, s) - p_0 \tilde{c} + p_0 \mu (r - s), \\ f(\sigma, y) &= \varphi(y, s) - \varphi(y, r) - p_0 \mu (r - s).\end{aligned}$$

Поясним вид целевой функции предприятия: поскольку предприятие занижает оценку s параметра r , завышая тем самым свои расходы (а центр компенсирует предприятию именно расходы) по отношению к фактическим расходам, то разность $\varphi(y, s) - \varphi(y, r)$ представляет собой не что иное, как сумму, на которую предприятие обманывает центр.

Еще раз оговорим порядок функционирования системы и информированность участников:

- общим знанием является: $H(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$, $\chi(\cdot)$, p_0 и \tilde{c} ;
- центр определяет вероятность аудита p_0 и сообщает ее предприятию;
- предприятие сообщает центру оценку s своего типа r ;
- центр назначает предприятию план x и стимулирование (1);
- предприятие выбирает УБ y ;
- центр выплачивает предприятию вознаграждение в соответствии с (1);
- с вероятностью p_0 центр проводит аудит.

Следует также отметить, что в зависимости от поведения центра в отношении выбора вероятности аудита p_0 можно выделить три задачи. В рассматриваемом случае центр объявляет вероятность аудита. Также центр может не объявлять p_0 , выбирая стратегию максимального гарантированного результата по этому параметру. Третий вариант – центр может объявить предприятию не вероятность p_0 , а функцию $p_0(s)$ – зависимость вероятности проведения аудита от сообщения предприятия.

При использовании системы стимулирования (1) предприятию выгодно выполнять план: $y = x$. Для доказательства этого утверждения достаточно заметить, что, в точности выполняя план, предприятие получает полезность $\varphi(y, s) - \varphi(y, r) - p_0 \mu (r - s)$; отклоняясь же от плана, предприятие получает полезность: $-\varphi(y, r) - p_0 \mu (r - s)$, что заведомо ему невыгодно, так как $\forall y, \forall s : \varphi(y, s) \geq 0$.

Центр назначает предприятию оптимальный для себя план – норматив уровня безопасности $x^*(s)$, решая следующую задачу:

$$(2) \min_{r \geq 0} \{H(x) - \varphi(x, s) - \tilde{c} p_0 + p_0 \mu (r - s)\} \rightarrow \max_{x \geq 0} .$$

Предприятие выбирает оптимальное для себя сообщение $s^*(p_0, r)$ центру о своем типе, решая следующую задачу:

$$(3) \varphi(x^*(s), s) - \varphi(x^*(s), r) - p_0 \mu (r - s) \rightarrow \max_{s \geq 0} .$$

Далее, центр оптимизирует свою целевую функцию по вероятности проведения аудита p_0 , решая следующую задачу:

$$(4) \tilde{c} p_0 + p_0 \mu (r - s^*(p_0, r)) \rightarrow \max_{p_0 \in [0;1]} :$$

Пусть $H(y) = y$, $\varphi(y, r) = y^2 / 2 r$.

Утверждение 2.8. Для того чтобы предприятие сообщало центру достоверную информацию, достаточно выполнения неравенства:

$$(5) \mu p_0 \geq 1 / 2 .$$

Доказательство утверждения 2.8. Из (2) находим назначаемый предприятию план: $x^*(s) = s$, из (3) находим оптимальное сообщение предприятия: $s^*(p_0, r) = (1 / 2 + \mu p_0) r$. Поскольку, как предполагалось выше, предприятие предоставляет центру в общем случае искаженную информацию $s \leq r$ о своем типе, то оптимальное сообщение предприятия в данном случае: $s^*(p_0, r) = \min [(1 / 2 + \mu p_0) r; r]$. Утверждение 2.8 доказано.

Содержательно утверждение 2.8 означает, что, выбирая систему штрафов и вероятность проведения аудита (и сообщая эту информацию предприятию), удовлетворяющую (5), центр может добиться неманипулируемости, т.е. сообщения предприятием достоверной информации о своих затратах на обеспечение и поддержание УБ. Кроме того, следует заметить, что при выполнении условия (5) предприятие будет сообщать достоверную информацию о своем типе. Поэтому далее будем рассматривать условия, при которых (5) не выполняется, то есть, будем считать, что $p_0 < \mu / 2$.

Из (4) находим оптимальную вероятность проведения проверки, решая следующую оптимизационную задачу:

$$\min_{r \geq 0} [r(1 / 4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) - \tilde{c} p_0] \rightarrow \max_{p_0 \in [0;1]}$$

Пусть множество возможных типов предприятия составляет отрезок $[r^-, r^+]$, то есть центру известны минимально и максимально возможные типы предприятия. Тогда оптимизационную задачу можно представить в виде следующей системы:

$$(6) \begin{cases} [r^+(1/4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) - \tilde{c}p_0] \rightarrow \max_{p_0 \in [0;1]} (1/4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) \leq 0, \\ [r^-(1/4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) - \tilde{c}p_0] \rightarrow \max_{p_0 \in [0;1]} (1/4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) \geq 0. \end{cases}$$

Однако в силу утверждения 2.8 рассматривается случай $p_0 < \mu/2$, и множеством решений первого неравенства системы (6) является пустое множество, поэтому далее будем рассматривать только оптимизационную задачу и второе неравенство системы (6).

Утверждение 2.9. Оптимальная для центра вероятность проведения аудита

$$(7) p_0^* = (\mu r^- - \tilde{c}) / 2\mu^2 r^-, p_0 \in [0; \mu/2].$$

Справедливость этого утверждения обосновывается следующим образом: решая неравенство системы (6) относительно p_0 , получаем:

$$(8) [r^-(1/4 + \mu p_0 - \mu^2 p_0^2) - \tilde{c}p_0] \rightarrow \max_{p_0 \in [0;1]} p_0 \in [0; \mu/2].$$

Решая (8), получаем выражение (7) для оптимальной вероятности проведения аудита.

Итак, в рассматриваемой модели центр может выбрать вероятность p_0 проведения проверки и коэффициент штрафа μ таким образом, что предприятию будет выгодно сообщать свой истинный тип. Если же по каким-либо причинам центр не имеет возможности объявить такие параметры (например, μ превышает нормативно установленный коэффициент штрафов), то центр выбирает вероятность проведения проверки, максимизируя свою целевую функцию так, как показано в утверждении 2.9. В этом случае доход центра может оказаться больше, чем при честном поведении предприятия. То есть, данная модель показывает, что с помощью таких инструментов как штрафы, линейно зависящие от размера «обмана», и объявление вероятности проверок, в ЭкЭС можно создать такие условия, что честное поведение будет выгодно всем участникам.

2.7. МЕХАНИЗМЫ СНИЖЕНИЯ ОЖИДАЕМОГО УЩЕРБА

Величина ущерба окружающей среде, как правило, является недетерминированной величиной, поэтому в настоящем разделе рассматриваются механизмы стимулирования снижения уровня ожидаемого ущерба. В качестве вероятностного распределения, описывающего размер ущерба, выбрано распределение Парето.

Действия, выбираемые предприятием (например, объем производства, затраты на природоохранные мероприятия и т.д.) определяют параметры этого распределения.

Закон Парето и распределение Парето. Известен так называемый закон Парето (иногда его называют «закон 80 / 20», на жаргоне – «пивной закон», в соответствии с которым 20 % людей выпивают 80 % пива), отражающий неравномерность распределения характеристик экономических и социальных явлений и процессов, свойства природных и техногенных катастроф, распределение ущерба от них и т.д. [64, 171, 183]:

- 20 % населения владеют 80 % капиталов (первоначальная формулировка самого В. Парето [176]);

- 80 % стоимости запасов на складе составляет 20 % номенклатуры этих запасов;

- 80 % прибыли от продаж приносят 20 % покупателей;

- 20 % усилий приносят 80 % результата;

- 80 % проблем обусловлены 20 % причин;

- за 20 % рабочего времени работники выполняют 80 % работы;

- 80 % работы выполняют 20 % работников и т.д.

«Формализацией» закона Парето является распределение Парето случайной величины W , $W \geq W_0 > 0$, характеризуемое двумя параметрами – минимально возможным значением W_0 и показателем степени $\alpha > 0$:

$$(1) p(\alpha, W_0, W) = \frac{\alpha}{W_0} \left(\frac{W_0}{W} \right)^{1+\alpha}.$$

Плотности распределения (1) соответствует интегральная функция распределения

$$(2) F_\alpha(\alpha, W_0, W) = 1 - \left(\frac{W_0}{W} \right)^\alpha.$$

Для распределения Парето существуют только моменты, порядка, меньшего, чем степень α . Например, математическое ожидание случайной величины W с распределением (1) существует при $\alpha > 1$ и равно

$$(3) E W = \frac{\alpha}{\alpha - 1} W_0.$$

В рамках предположения о том, что случайная величина распределена по Парето, зная математическое ожидание $E W$ и минимальное значение W_0 , можно вычислить (см. (3)) параметр распределения α :

$$(4) \alpha = \frac{E W}{E W - W_0}.$$

Описание модели. Будем считать, что предприятие выбирает свои действия – объем производства $u \geq 0$, и размер затрат на природоохранные мероприятия $v \geq 0$; производство неизбежно приводит к ущербу $W_0 = W_0(u, v)$. Реализованная величина ущерба $W \geq W_0$ является случайной величиной, описываемой распределением (1). Центр осуществляет мониторинг деятельности предприятия и имеет возможность налагать на последнее штраф $\chi(W)$, зависящий от величины фактического ущерба.

Предположим, что на момент принятия решений участники (центр и предприятие) не знают размера фактического ущерба, а имеют лишь информацию о распределении вероятностей и используют вычисление ожидаемой полезности для устранения неопределенности. Таким образом, математическое ожидание целевой функции предприятия имеет вид:

$$(5) f(u, V, \chi(\cdot)) = c u - z(u) - v - \int \chi(W) p(\alpha, W_0(u, v), W) dW$$

и зависит от выбираемой центром системы штрафов $\chi(\cdot)$ и действий u и v самого предприятия. Принципиально важно, что в рассматриваемой модели ни центр, ни предприятие на момент выбора своих стратегий не знают будущего значения величины ущерба.

Предприятие выберет действие из множества $P(\chi(\cdot))$ действий, доставляющих максимум математическому ожиданию его функции полезности, то есть:

$$(6) P(\chi(\cdot)) = \text{Arg} \max_{u, v \geq 0} f(u, v, \chi(\cdot)).$$

Пусть выполнена гипотеза благожелательности (при прочих равных предприятие выбирает наиболее выгодные для центра действия [50]). Тогда задача центра заключается в выборе системы штрафов $\chi(\cdot)$, максимизирующей математическое ожидание критерия центра $E_W \Phi(u, v, W)$ (его функции полезности, выигрыша и т.д.) на множестве (6):

$$(7) \max_{(u, v) \in P(\chi(\cdot))} E_W \Phi(u, v, W) \rightarrow \max_{\chi(\cdot)}.$$

Общего (для произвольных вероятностных распределений) аналитического решения задачи (7) на сегодняшний день не известно (см. достаточные условия оптимальности различных систем стимулирования в [97]), за исключением нескольких частных случаев, в числе которых – рассматриваемый ниже случай распределения Парето [35].

Фиксируем детерминированный уровень ущерба $w_0 \geq 0$. Вычислим действия предприятия, максимизирующие его выигрыш при условии непревышения этого уровня и соответствующий выигрыш:

$$(8) S(w_0) = \text{Arg} \max_{\{u \geq 0, v \geq 0 | W_0(u, V) = w_0\}} [c u - z(u) - v],$$

$$(9) f_0(w_0) = \max_{\{u \geq 0, v \geq 0 | W_0(u, v) = w_0\}} [c u - z(u) - v].$$

Задача принятия решений предприятием фактически свелась к выбору того уровня ущерба w_0 , на который оно будет ориентироваться:

$$(10) P_0(\chi(\cdot)) = \text{Arg} \max_{w_0 \geq 0} [f_0(w_0) - \int_{w_0}^{+\infty} \chi(W) p(\alpha, w_0, W) dW].$$

Задача выбора оптимальной по тому или иному критерию системы штрафов при условии, что поведение предприятия описывается (10), является хрестоматийной детерминированной задачей стимулирования, для которой в теории управления организационными системами накоплен большой опыт исследования [97, 98, 162, 164]. Рассмотрим ряд типовых классов систем штрафов.

Линейная система штрафов. Предположим, что центр использует линейную функцию штрафов вида

$$(11) \chi_L(W) = \chi_0 + \mu W.$$

Тогда гарантированный ущерб w_0 и действия, выбираемые предприятием и приводящие к нему (см. (8)), будут зависеть от двух параметров системы штрафов – χ_0 и μ :

$$(12) P_L(\chi_0, \mu) = \text{Arg} \max_{w_0 \geq 0} [f_0(w_0) - \chi_0 - \frac{\alpha \mu}{\alpha - 1} w_0].$$

Задачу (7) можно записать в виде следующей оптимизационной задачи:

$$(13) \max_{w_0 \in P_L(\chi_0, \mu)} \max_{(u, v) \in S(w_0)} E_W \Phi(u, v, W) \rightarrow \max_{\chi_0, \mu \geq 0}.$$

Рассмотрим пример. Пусть $W_0(u, V) = b_0 u / v$, $z(u) = u^2 / 2r$. Тогда решение задачи (8)-(9) имеет вид:

$$S = \{r(c - b_0/w_0), r b_0(c - b_0/w_0) / w_0\},$$

$$(14) f_0(w_0) = \frac{rc^2}{2} + \frac{b_0 r}{w_0} \left(\frac{b_0}{2w_0} - c \right).$$

Если $\Phi(u, v, W) = -W$, то

$$(15) E_W \Phi(u, v, W) = -\frac{\alpha}{\alpha - 1} w_0, w_0 \geq b_0 / c,$$

то есть центр заинтересован в минимизации гарантированного ущерба (последнее неравенство в (15) обеспечивает неотрицательность объемов производства, при которых достигается максимум выражения (14)).

Пусть $\alpha = 2$, $c = 1$, $b_0 = 4$, $r = 6$. Подставляя (14) в (12), можно найти комбинацию параметров (χ_0, μ) функции штрафа, при которых предприятию, максимизирующему целевую функцию

$$3 + \frac{24}{w_0} \left(\frac{2}{w_0} - 1 \right) - \chi_0 - 2 \mu w_0$$

выбором $w_0 \geq 4$, выгодно выбирать минимальный уровень гарантированного ущерба $w_0 = 4$. Вычислим выигрыш предприятия при выборе $w_0 = 4$ (отметим, что это достаточно экзотический случай – предприятие всю выручку от производства тратит на природоохранные мероприятия). Этот выигрыш равен $(-\chi_0 - 8 \mu)$. Потребуем, чтобы ожидаемый выигрыш предприятия был неотрицателен. Для этого достаточно взять $\chi_0 = -8 \mu$. Тогда легко найти минимальное значение μ , равное примерно 0,12, при котором максимум выигрыша предприятия будет достигаться при выборе минимального уровня гарантированного ущерба. Размер штрафа за уровень ущерба $w_0 = 4$ равен примерно -0,48 (отметим, что штраф отрицателен, то есть центр стимулирует предприятие за стремление минимизировать ожидаемый ущерб).

Компенсаторная система штрафов. Задача синтеза оптимальной компенсаторной системы штрафов заключается в нахождении такой системы штрафов $\chi_K(W)$, математическое ожидание которой с точностью до константы равно выигрышу предприятия²⁵ (9):

$$(16) \int_{w_0}^{+\infty} \chi_K(W) p(\alpha, w_0, W) dW - f_0(w_0) = \text{Const.}$$

²⁵ Задача существенно усложнится, если на функции штрафов наложены дополнительные ограничения.

Если условие (16) выполнено для любых w_0 , то в силу (10) математическое ожидание выигрыша предприятия не зависит от размера гарантированного ущерба, на который он ориентируется. Поэтому, в силу гипотезы благожелательности, предприятие выберет действия, наиболее предпочтительные с точки зрения центра.

В рамках рассматриваемого примера из (14) и (16) при $\alpha = 2$ получаем:

$$(17) \int_{w_0}^{+\infty} \chi_{\kappa}(W) d\left(\frac{1}{W^2}\right) = -\frac{rc^2}{2(w_0)^2} - \frac{b_0 r}{(w_0)^3} \left(\frac{b_0}{2w_0} - c\right).$$

Решение уравнения (17) имеет вид:

$$(18) \chi_{\kappa}(W) = \frac{rc^2}{2} + \frac{(b_0)^2 r}{(w_0)^2} - \frac{3cb_0 r}{2w_0}.$$

Для выбранных выше числовых значений параметров получаем:

$$\chi_{\kappa}(W) = 3 + \frac{96}{(w_0)^2} - \frac{36}{w_0}.$$

На Рис. 36 изображена компенсаторная система штрафов (график выигрыша предприятия (14) приведен пунктирной линией). Видно, что за невысокие величины ущерба (от 4 до 8) центр вынужден доплачивать предприятию (штраф отрицателен, но так как он входит в целевую функцию предприятия со знаком минус, получается, что он в указанном диапазоне играет роль поощрения).

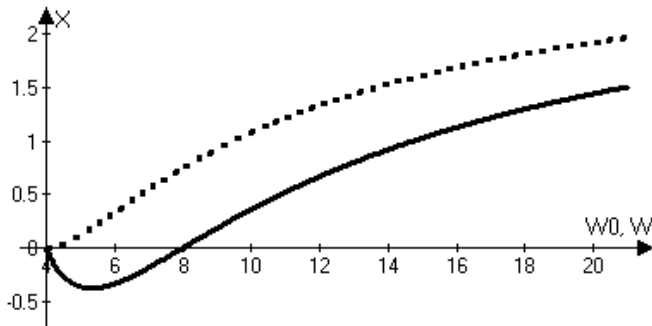


Рис. 36. Компенсаторная система штрафов

Если предприятие выберет минимальное значение гарантированного ущерба, равное 4, то математическое ожидание размера штрафа равно нулю.

Ступенчатая система штрафов. Известно (см. [26, 97]), что и в детерминированном случае, и, зачастую, в условиях вероятностной неопределенности, оптимальна ступенчатая система штрафов. Поэтому исследуем систему штрафов

$$(19) \chi_c(W_x, W) = \begin{cases} \chi_0, & W \geq W_x, \\ 0, & W < W_x, \end{cases}$$

в которой предприятие штрафуются на сумму χ_0 в случае, если ущерб равен или превышает значение W_x (условно можно рассматривать этот показатель как предельно допустимый ущерб), и не штрафуются вовсе, если фактический ущерб меньше этой величины.

Вычислим математическое ожидание выражения (19):

$$(20) E \chi_c(W_x, W) = \chi_0 \begin{cases} 1, & w_0 \geq W_x, \\ \left(\frac{w_0}{W_x}\right)^\alpha, & w_0 < W_x, \end{cases}$$

то есть предприятие безусловно штрафуются на максимальную величину, если ориентируется на минимальный ущерб, превышающий предельное установленное центром значение. В случае же, если оно ориентируется на минимальный ущерб, не превышающий установленный центром, то штраф оказывается меньше. Далее задача сводится к выбору двух параметров системы штрафов (20), приводящих к наиболее предпочтительному для центра выбору предприятия.

В рамках рассматриваемого примера из (10), (14) и (20) получаем, что задача, решаемая предприятием, имеет вид:

$$(21) \frac{rc^2}{2} + \frac{b_0 r}{w_0} \left(\frac{b_0}{2w_0} - c\right) - \chi_0 \begin{cases} 1, & w_0 \geq W_x \\ \left(\frac{w_0}{W_x}\right)^\alpha, & w_0 < W_x \end{cases} \rightarrow \max_{w_0 \geq b_0/c} .$$

Найдем значения параметров функции штрафов (19), при которых предприятию выгодно выбирать минимальный уровень гарантированного ущерба $w_0 = 4$, и при этом (для сравнимости с рассмотренными выше системами штрафов) он будет получать нулевой ожидаемый выигрыш.

Подставляя выбранные выше числовые значения, из последнего условия получаем: $16 \chi_0 / W_x = 0$, что невозможно. Значит, невозможно ступенчатыми системами штрафов побудить предприятие

выбрать данное действие²⁶. Содержательно это объясняется тем, что штрафы (20) положительны («тяжелый хвост» распределения Парето приводит к тому, что, ориентируясь даже на минимальный ущерб, при достаточно большом предельно допустимом значении предприятие все равно будет оштрафовано на конечную величину), то есть центр не может поощрять предприятие за низкий уровень ожидаемого ущерба.

На Рис. 37 изображен выигрыш предприятия при использовании центром ступенчатой системы штрафов:

1) график выигрыша предприятия (14) в отсутствии штрафов приведен пунктирной линией;

2) жирная непрерывная линия соответствует «слабым штрафам» – значениям $\chi_0 = 1, W_x = 8$;

3) тонкая штрихпунктирная линия соответствует ужесточению требований (по сравнению со вторым случаем), то есть снижению предельно допустимого ущерба: $\chi_0 = 1, W_x = 6$;

4) тонкая непрерывная линия соответствует ужесточению наказания: $\chi_0 = 2, W_x = 8$.

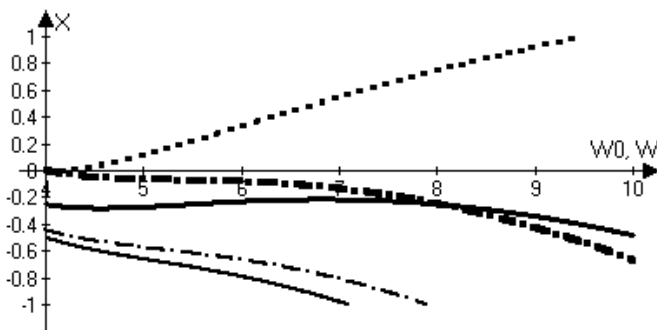


Рис. 37. Выигрыш предприятия при ступенчатой системе штрафов

Видно, что при слабых штрафах (случай 1) предприятие будет ориентироваться на ожидаемый ущерб, примерно равный 7, то есть чуть меньше, чем в два раза больший минимально возможного. При ужесточении требований или ужесточении наказания (случаи 3 и 4

²⁶ От этого недостатка ступенчатой системы штрафов можно легко избавиться, взяв в правой части выражения (19) вместо нуля отрицательную константу – см. выражение (22).

соответственно) предприятию выгодно выбирать минимальное значение ожидаемого ущерба, равное 4. Однако в последних двух случаях его выигрыш отрицателен.

Как отмечалось выше (см. сноску 26), для того, чтобы сделать выигрыш предприятия при выборе $w_0 = 4$ равным нулю, в рассматриваемом примере достаточно использовать систему штрафов

$$(22) \chi_\varepsilon(W_x, W) = \begin{cases} \chi_0, & W \geq W_x, \\ -\varepsilon, & W < W_x, \end{cases}$$

математическое ожидание которой равно

$$(23) E \chi_\varepsilon(W_x, W) = \begin{cases} \chi_0, & w_0 \geq W_x, \\ -\varepsilon + (\chi_0 + \varepsilon) \left(\frac{w_0}{W_x} \right)^\alpha, & w_0 < W_x. \end{cases}$$

Выберем $\varepsilon = \chi_0 / 3$, тогда выигрыш предприятия (как и ожидаемый штраф!) при выборе $w_0 = 4$ равен нулю при $W_x = 8$. Например²⁷, при $\chi_0 = 1$ (ср. со случаем «слабых штрафов» выше) предприятию выгодно выбирать минимально возможный уровень ожидаемого ущерба – см. жирную штрихпунктирную линию на Рис. 37.

Сравнение различных систем штрафов. Выше были рассмотрены три системы штрафов – линейная, компенсаторная и ступенчатая. Общим их характеристическим свойством является наличие двух режимов – при малом уровне ожидаемого ущерба предприятие поощряется, при большом – наказывается. Это свойство редко наблюдается на практике, так как обычно функции поощрения (стимулирования, мотивации) и наказания (контроля, надзора, обеспечения выполнения нормативных требований) выполняют различные органы. Тем более привлекательным представляется совмещение в одном механизме управления обоих этих черт.

Рассмотренные системы штрафов имеют различную содержательную интерпретацию: в линейном механизме штрафов имеется ставка платы за ущерб, в компенсаторном от предприятия требуется «компенсация» нанесенного им ущерба, в ступенчатой системе штрафов предприятие наказывается за нарушение нормативов (последний случай наиболее близок к используемым на практике мерам

²⁷ Множество тех значений χ_0 , при которых агенту выгодно выбирать минимальный уровень ожидаемого ущерба, в рассматриваемом примере определяется условием отрицательности целевой функции агента при любых $w_0 \geq 4$.

административного воздействия на нарушителей экологических нормативов).

С точки зрения предприятия, во всех трех случаях оно получает при минимальном уровне ожидаемого ущерба одинаковый выигрыш. С точки зрения центра, в первом случае он несет большие ожидаемые затраты – см. Табл. 8, в которой представлена сводка результатов настоящего раздела (числовые данные соответствуют рассмотренному примеру).

Табл. 8. Сравнение различных систем штрафов

Система штрафов	Выражение	Выбор предприятия (w_0)	Математическое ожидание выигрыша предприятия	Математическое ожидание затрат центра
Линейная	(11)	4	0	0,48
Компенсаторная	(16)	4	0	0
Ступенчатая	(22)	4	0	0

В заключение настоящего раздела отметим, что, используя приведенную технику анализа механизмов стимулирования снижения ожидаемого ущерба, можно решать задачи синтеза оптимальных систем штрафов более сложного вида, в том числе – при наличии ограничений и т.д. Кроме того, следует помнить, что рассматривался случай внешней неопределенности, то есть считалось, что внутренняя неопределенность отсутствует – центр полностью информирован о всех существенных параметрах. Учет внутренней неопределенности можно производить по аналогии с тем, как это делалось в [97, 175].

ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Изложение материала настоящей главы имеет следующую структуру. Для оценки эффективности механизмов управления экологической безопасностью (далее – безопасностью) вводится модель управления уровнем безопасности в регионе (раздел 3.1). Затем рассматриваются модели механизмов платы за риск (раздел 3.2), финансирования снижения уровня риска (раздел 3.3.), компенсации затрат на снижение уровня риска (раздел 3.4), продажи квот на уро-

вень риска (раздел 3.5), страхования (раздел 3.6), экономической мотивации (раздел 3.7), согласования интересов органов управления (раздел 3.8).

3.1. МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РЕГИОНЕ

Рассматриваемая иерархия управления имеет три уровня. Верхний уровень – *территориальный орган управления*. Предприятие представлено в виде двух уровней – средний уровень, в котором объединены функции Совета директоров, Генерального директора и руководителя службы производственного контроля, и нижний уровень (руководитель структурного подразделения). Задачей верхнего уровня является определение требований к системе управления безопасностью на предприятиях и контроль выполнения этих требований.

Обозначим через u_i *уровень безопасности* (УБ) – уровень эффективности *системы управления безопасностью* (СУБ) на предприятии i . Уровень безопасности – это некоторый комплексный показатель, характеризующий действующую на предприятии СУБ. В качестве УБ можно принять вероятность безаварийной работы, либо ожидаемый ущерб от аварий на лучших (по критерию безопасности) предприятиях (отечественных или зарубежных), отнесенный к ожидаемому ущербу на данном предприятии. В последнем случае УБ $u_i = 1$ (100 %) означает, что предприятие является лучшим в России (или в мире, в зависимости от базы сравнения) по УБ. Обозначим далее x_i – нормативный УБ для i -го предприятия (то есть требования к СУБ предприятия i со стороны контролирующего органа).

Отметим, что нормативные УБ для разных предприятий могут быть различными. Это зависит как от категории предприятия по степени опасности производства, так и от существующего уровня безопасности. Дело в том, что нереально требовать от предприятия, имеющего низший уровень эффективности СУБ, чтобы оно сразу (за рассматриваемый период времени, например, квартал) перешло к УБ, соответствующей лучшим мировым стандартам. Стратегия контролирующего органа должна состоять в установлении промежуточных УБ, которые предприятия реально могут обеспечить за рассматриваемый период времени. Постепенно повышая требования

(увеличивая нормативный уровень), контролирующий орган сможет обеспечить переход предприятий на требуемый УБ.

Выбор стратегии повышения УБ в настоящей работе рассматривается как последовательность двух этапов. На первом этапе определяется стратегия повышения *регионального уровня безопасности* (РУБ). Под региональным УБ может пониматься сумма нормативных уровней безопасности (УБ) предприятий региона (или средний УБ, если суммарный уровень разделить на число предприятий). На втором этапе определяется нормативный УБ каждого предприятия в рассматриваемом периоде так, чтобы сумма нормативных уровней равнялась региональному уровню данного периода, определенному на первом этапе, а суммарные затраты предприятий на достижение регионального УБ были минимальными. Информация о затратах на достижение тех или иных значений УБ представляется предприятиями как составная часть отчетов о системе управления безопасностью (СУБ) на предприятии. Для того чтобы обеспечить достоверность отчетных данных, вводится *механизм инспекций* (контрольных проверок) состояния СУБ на предприятии, включающий систему санкций (штрафы, приостановка деятельности предприятия на определенное время) в случае, если отчетные данные не соответствуют фактическому положению дел. Таким образом, предлагаемый путь повышения УБ предприятий региона предполагает решение трех основных задач.

1. Задача определения стратегии повышения регионального УБ.
2. Задача определения нормативных УБ для предприятий региона.
3. Задача определения системы санкций, обеспечивающих представление достоверной информации о состоянии СУБ в отчетах предприятий.

Кроме того, необходимо обеспечить выполнение предприятиями (с учетом их интересов) требований по УБ, используя соответствующие механизмы (см. главу 2).

Ниже рассматриваются модели и методы решения указанных задач.

Задача определения стратегии повышения регионального уровня безопасности. Примем за $X_{\text{кон}} = 1,0$ оценку регионального УБ, соответствующую конечной цели – создать СУБ, обеспечивающую УБ, который может позволить себе регион в существующих социально-экономических условиях (концепция достаточной безопасности, вытекающая из концепции устойчивого развития общест-

ва). Существующий УБ примем за $X_0 = 0$. Введем дискретную шкалу промежуточных УБ, например, $X_1 = 0,5$, $X_2 = 1,0$, каждому из которых соответствуют вполне определенные требования к СУБ предприятий. Пусть перед регионом стоит задача обеспечить выход на требуемый региональный УБ $X_T = 1,0$ за T периодов времени (месяцев, кварталов, лет, в зависимости от того, что понимается под периодом). Примем для определенности в качестве примера, что $T = 4$ кварталам (один год). Региональной стратегией обеспечения требуемого УБ назовем вектор $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$, где X_j определяет региональный УБ, который должен быть достигнут к концу j -го периода. Будем считать, что достигнутый УБ в дальнейшем не уменьшается, и поэтому $0 \leq X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq X_4 = 1$. Обозначим далее C_{ij}^t – затраты на достижение и поддержание в периоде t уровня X_j , если в предыдущем периоде был достигнут уровень X_i (если $j = i$, то C_{ij}^t – затраты на поддержание уровня i в периоде t). Величина C_{ij}^t определяется на основе отчетов предприятий, экспертных оценок и опыта других регионов. При этом учитывается изменение стоимости денег со временем (производится дисконтирование). Задача заключается в определении стратегии X , обеспечивающей к концу периода $T = 4$ уровень безопасности $X_T = X_4 = 1$ с минимальными затратами.

Для решения этой задачи построим граф возможных стратегий – см. Рис. 38. Начальная вершина соответствует началу первого периода. Первый слой отражает возможные варианты стратегии к концу первого периода (оставить прежний УБ $X_0 = 0$, увеличить УБ до $X_1 = 0,5$, либо увеличить до требуемого уровня $X_2 = 1,0$). Второй слой аналогично отражает возможные варианты стратегии к концу второго периода, третий – к концу третьего, и, наконец, четвертый слой содержит только одну конечную вершину со значением $X_4 = 1,0$, поскольку к концу четвертого периода необходимо обеспечить требуемый УБ, который был принят равным единице.

Заметим теперь, что любому пути в графе, соединяющему начальную вершину с конечной, соответствует вполне определенная стратегия повышения УБ. Верно и обратное – любой стратегии, обеспечивающей к концу четвертого периода УБ, равный 1, соответствует вполне определенный путь в графе (или несколько путей), соединяющий начальную вершину с конечной. Так, например, стратегии $X = (0; 0,5; 0,5; 1)$ соответствует путь в графе, отмеченный на Рис. 38 жирными линиями.

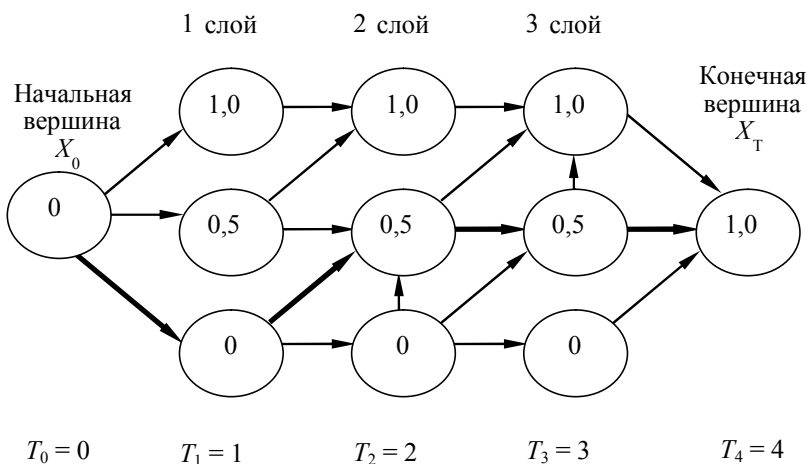


Рис. 38. Граф возможных стратегий повышения УБ

Для того чтобы выделять пути графа, будем обозначать j -ю вершину i -го слоя через (ij) . Тогда выделенный жирными линиями путь на Рис. 38 будет обозначен как $[X_0; (1; 1); (2; 2); (3; 2); X_T]$, где X_0 – начальная вершина, X_T – конечная вершина. С помощью построенного графа возможных стратегий можно решать задачу выбора оптимальной стратегии по различным критериям. Так, если критерием являются затраты на создание и поддержание УБ в подразделениях предприятия, обеспечивающих требуемый уровень безопасности $X_T = 1,0$, то поступаем следующим образом. Примем в качестве длины дуги $[(t, i); (t + 1, j)]$ затраты C_{ij}^t на создание и поддержание в периоде t СУБ, обеспечивающий УБ, равный X_j , при условии, что в начале периода t этот уровень был равен X_i . Тогда длина любого пути, соединяющего начальную вершину с конечной, будет равна затратам на создание и поддержание УБ при стратегии, соответствующей этому пути. Таким образом, задача свелась к определению пути минимальной длины в графе возможных стратегий.

На Рис. 39 приведен пример решения задачи. Числа в круглых скобках у дуг равны длинам дуг. Числа в квадратных скобках у вершин равны длине кратчайшего пути из начальной вершины в данную вершину. Кратчайший путь из начальной вершины в конечную $[X_0; (1; 0); (2; 0); (3; 1); X_T]$ выделен жирными линиями. Соответствующая стратегия имеет следующий вид. Первые два квартала на

предприятиях поддерживается существующий УБ. К концу третьего квартала УБ на предприятиях достигает величины $X_1 = 0,5$, а к концу четвертого – требуемой величины $X_2 = 1,0$. Суммарные затраты при этом составляют $C = 32$ единицы.

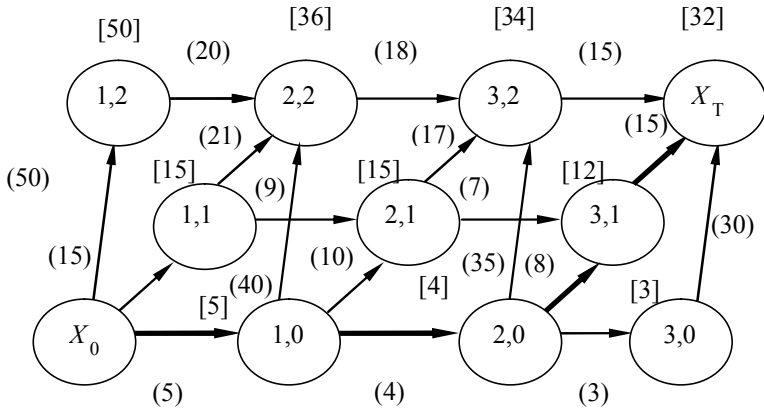


Рис. 39. Пример расчета возможных стратегий на основании графа

Интересно отметить, что при решении задачи минимизации затрат на создание СУБ за $T = 4$ квартала, одновременно получено решение задачи для всех $t \leq T$. Действительно, как уже отмечалось выше, числа в квадратных скобках определяют минимальные затраты на создание СУБ соответствующего уровня к концу соответствующего периода. Поэтому числа, стоящие у вершин $(t, 2)$, где $t = 1, 2, 3, 4$, определяют минимальные затраты на создание требуемого УБ $X_2 = 1,0$ за t периодов. Из Рис. 39 видно, что достижение УБ за три периода требует 34 единицы, за 2 периода – 36 единиц, за 1 период – 50 единиц.

Критерий минимизации затрат не учитывает ожидаемого ущерба. Очевидно, что ожидаемый ущерб тем больше, чем ниже уровень безопасности. Обозначим через W_{ij}^t – ожидаемый ущерб от аварий в периоде t , если в начале периода СУБ обеспечивала уровень безопасности X_i , а в конце – X_j . Поставим задачу определить оптимальную стратегию повышения УБ по критерию суммы затрат на создание и поддержание системы возможного ущерба.

Для решения этой задачи достаточно в качестве длин дуг в графе возможных стратегий принять сумму затрат C_{ij}^t и ожидаемого ущерба W_{ij}^t и определить кратчайший путь. Примем для примера, что ожидаемый ущерб при уровне безопасности $X_0 = 0$ составляет 50 единиц, при $X_1 = 0,5$ – 20 единиц, а при $X_2 = 1,0$ – 6 единиц независимо от периода t . Если в периоде t система переходит от уровня X_i в начале периода к уровню X_j в конце, то возможный ущерб оценим как среднее из возможных ущербов при уровнях X_i и X_j соответственно. Таким образом, при переходе в периоде от уровня $X_0 = 0$ к уровню $X_1 = 0,5$ ущерб оценивается в $(50 + 20) / 2 = 35$ единиц, а к уровню $X_2 = 1,0$ – в $(50 + 6) / 2 = 28$ единиц. Наконец, при переходе в периоде t от уровня $X_1 = 0,5$ к уровню $X_2 = 1,0$ ожидаемый ущерб оценивается в $(20 + 6) / 2 = 13$ единиц. Добавляя ожидаемые ущербы к затратам, получаем граф возможных стратегий, изображенный на Рис. 40.

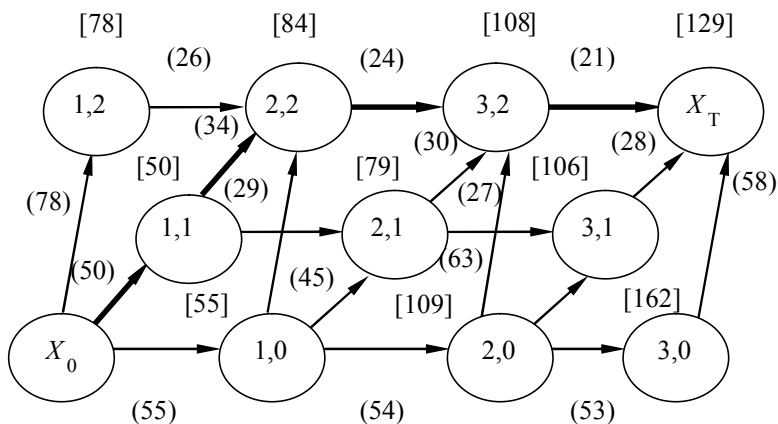


Рис. 40. Граф возможных стратегий обеспечения УБ с учетом возможного ущерба

Видно, что стратегия кардинально изменилась. Теперь уже к концу первого квартала создаются СУБ, обеспечивающие региональный УБ, равный $X_1 = 0,5$, а к концу второго квартала региональный УБ будет соответствовать требуемому: $X_2 = 1,0$. Затраты, конечно, будут существенно больше (69 единиц вместо 32), но

прогнозируемый ущерб будет значительно меньше (60 единиц вместо 148 единиц). Описанная модель и метод определения оптимальной стратегии развития региональной СУБ, естественно, применимы при любом числе дискретных УБ. По мере уточнения данных о затратах на развитие СУБ и о прогнозируемом ущербе целесообразно корректировать стратегию, решая описанную выше задачу с уточненными данными.

Задача определения нормативных уровней безопасности для предприятий региона. Выше рассмотрена задача определения стратегии развития системы управления экологической безопасностью в регионе. В результате ее решения определяется региональный УБ, который должны обеспечить СУБ, создаваемые на предприятиях региона, в каждом из рассматриваемых периодов. Следующая задача заключается в том, чтобы на основе полученного значения регионального УБ определить задания на увеличение нормативных УБ для предприятий региона. Обозначим через ΔX планируемое увеличение регионального УБ по сравнению с предыдущим периодом, а через x_i – задание на увеличение нормативного уровня для i -го предприятия. Сумма приростов нормативных уровней предприятий должна быть равной увеличению регионального уровня, то есть

$$(1) \sum_{i=1}^n x_i = \Delta X,$$

где n – число предприятий в регионе. Обозначим через $\varphi_i(x_i)$ затраты i -го предприятия на развитие СУБ для обеспечения требуемого прироста нормативного уровня. Поставим задачу определить приоритеты нормативных уровней таким образом, чтобы суммарные затраты на развитие СУБ были минимальными. Формально задача состоит в определении $x_i \geq 0, i = \overline{1, n}$, удовлетворяющих условию (1) и минимизирующих выражение

$$(2) \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i).$$

Эта задача является задачей математического программирования, методы решения которой хорошо разработаны.

Проблема, однако, заключается в том, что вид функций $\varphi_i(x_i)$ может быть неизвестен региональному органу, который должен решать эту задачу. Информацию о затратах на развитие СУБ можно получить только от самих предприятий. Предприятия же могут быть не заинтересованы в представлении достоверных сведений. Действи-

тельно, желая получить меньшее задание на прирост УБ, предприятия могут завянуть затраты, которые требуются для развития СУБ. Возникает проблема обеспечения достоверности представляемой предприятиями информации. Для ее решения необходимо создать определенные экономические стимулы для предприятий в развитии СУБ.

Примем, например, что предприятие поощряется за прирост УБ. Величина поощрения равна αx_i , где α – поощрение за единицу прироста. В качестве такого поощрения могут выступать налоговые льготы (освобождение от налогов на сумму αx_i при росте УБ на величину x_i , уменьшение штрафов за низкий уровень эффективности СУБ и т.д.). Итак, если введены стимулы за рост УБ, то экономические интересы предприятия можно записать в виде разности стимулов и затрат:

$$(3) f_i(x_i) = \alpha x_i - \varphi_i(x_i), \quad i = \overline{1, n}.$$

В теории активных систем доказано (см. [16, 20]), что для того, чтобы получить от предприятий достоверную информацию, территориальный орган должен применять так называемые *механизмы «честной игры»* при определении нормативных УБ. Суть этих механизмов в том, что территориальный орган назначает задание x_i на рост нормативного УБ, которое является самым выгодным для предприятия по разности стимулов и затрат, то есть которое обеспечивает максимум выражения (3). Регулирующим параметром при этом выступает величина α . Территориальный орган подбирает такое значение α , при котором сумма выгодных для предприятия приростов x_i будет равна требуемому увеличению регионального УБ, то есть, величине ΔX . Рассмотрим действие описанного механизма на примере простых квадратичных функций затрат вида $\varphi_i(x_i) = (x_i)^2/2r_i$, $i = \overline{1, n}$ (обобщения можно найти в [98]). В этом случае выражение

(3) принимает вид

$$(4) f_i(x_i) = \alpha x_i - (x_i)^2/2r_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Эта функция достигает максимума в точке $x_i = \alpha r_i$. Если теперь определить параметр α из условия $\sum_{i=1}^n x_i = \alpha \sum_{i=1}^n r_i = \Delta X$, то есть

взять

$$(5) \alpha = \frac{\Delta X}{H},$$

где $H = \sum_{i=1}^n r_i$, то прирост нормативных уровней предприятия на величины $x_i = \alpha r_i$ является с одной стороны самым выгодным для предприятия, а, с другой стороны, обеспечит прирост регионального УБ на величину ΔX .

Покажем, что описанный механизм заинтересовывает предприятия в представлении достоверных сведений о затратах, необходимых для развития СУБ до нормативного уровня. Заметим, что для представления территориальному органу функции затрат $(x_i)^2/2r_i$, предприятию i достаточно сообщить параметр r_i , характеризующий эффективность мер по развитию СУБ. Обозначим через s_i оценку параметра r_i , сообщаемую i -м предприятием (как правило, предприятия завышают затраты, то есть $s_i \leq r_i$). Прирост нормативного уровня для i -го предприятия при оценке s_i составит $x_i = \alpha s_i$. В этом случае выражение (4) принимает вид

$$(6) f_i(x_i) = \alpha^2 \left(s_i - \frac{s_i^2}{2r_i} \right), i = \overline{1, n}.$$

Определим, какую оценку s_i следует сообщить предприятию i , для того, чтобы разность стимулов и затрат была максимальной. Для этого нужно найти максимум выражения (6) по s_i . Этот максимум достигается в точке $s_i = r_i$, то есть при сообщении предприятием достоверной информации.

Важным положительным свойством описанного механизма является тот факт, что увеличение регионального УБ на величину ΔX достигается при минимальной величине (2) суммарных затрат предприятий региона на развитие СУБ [20].

Задача стимулирования достоверности информации, сообщаемой предприятиями о состоянии СУБ. Выше отмечалось, что информация о состоянии СУБ и о затратах, требуемых для ее развития, представляется эксплуатирующими организациями (предприятиями, компаниями) в территориальные и региональные органы в отчетах о состоянии и развитии СУБ. Очевидно, что необходима система контроля достоверности отчетных сведений о достигнутом уровне СУБ. В противном случае неизбежно будет происходить искажение отчетных данных. Такой контроль осуществляется на основе механизма *инспекционных проверок*. Если в результате проверки выясняется несоответствие отчетных данных фактическому положению дел, то к предприятию применяются экономические

санкции в виде штрафов, либо приостановления деятельности и лишения лицензии, что также соответствует денежным потерям в виде упущенной выгоды.

С другой стороны, если представленный отчет о состоянии СУБ показывает, что предприятие не достигло в данном периоде требуемого нормативного уровня СУБ, то его также ожидают экономические санкции (штрафы, приостановление деятельности). Необходимо настроить систему штрафов таким образом, чтобы наказание за представление недостоверной информации о состоянии СУБ было больше, чем наказание за недостижение нормативного уровня.

Для того чтобы записать это условие в формальном виде, обозначим через \hat{y}_i УБ i -го предприятия согласно представленному отчету, а через y_i – его фактический УБ, определенный в результате инспекционной проверки. Если $\hat{y}_i > y_i$, то величину санкций примем прямо пропорциональной отклонению ($\hat{y}_i - y_i$), то есть штраф (или упущенная выгода) равна $b' (\hat{y}_i - y_i)$, где b' – параметр, численно равный штрафу за единичное отклонение. Если $x_i > \hat{y}_i$, то есть УБ согласно представленному отчету оказался ниже, чем нормативный уровень, установленный для данного периода, то величину санкций также примем прямо пропорциональной отклонению ($x_i - \hat{y}_i$), то есть равной $b'' (x_i - \hat{y}_i)$, где b'' – параметр, определяющий штраф (или упущенную выгоду) за единичное отклонение. Суммируя оба штрафа, получаем, что санкции за оба типа отклонений (отклонение y_i от \hat{y}_i и \hat{y}_i от x_i) будут равны следующей величине:

$$(7) b' (\hat{y}_i - y_i) + b'' (x_i - \hat{y}_i) = b'' x_i - b' y_i + (b' - b'') \hat{y}_i.$$

Поскольку территориальный орган заинтересован в достоверной информации, то есть в том, чтобы $\hat{y}_i = y_i$, то следует обеспечить выполнение условия $b' > b''$.

В предыдущих рассуждениях предполагалось, что контролирующий орган в силах провести проверку состояния СУБ каждого предприятия в данном периоде. К сожалению, как правило, это невозможно, в силу ограниченной численности инспекторов. Поэтому проверки должны иметь выборочный характер. Если в одном периоде можно с равной вероятностью провести проверку m_0 предприятий, то вероятность проверки отдельного предприятия

$p_0 = m_0 / n$. В этом случае ожидаемые санкции при отклонении \hat{y}_i от y_i составят $p_0 b' (\hat{y}_i - y_i)$, и для достоверности отчетной информации необходимо выполнение условия $p_0 b' > b''$. Поскольку $p_0 \leq 1$, то параметр b' должен превышать параметр b'' в бóльшей мере, чем в случае проверки всех предприятий. Чтобы исключить ситуации, когда в силу случайности выбора проверяемых предприятий предприятие может многие периоды не иметь инспекционных проверок, можно вероятность проверки предприятий сделать возрастающей по числу периодов, прошедших после последней проверки.

Рассмотренные три механизма управления созданием и развитием СУБ в регионе, позволяют:

- определить стратегию повышения регионального УБ, которая минимизирует сумму затрат на создание и развитие системы;
- снизить величину ожидаемого ущерба;
- сформировать нормативные УБ для предприятий региона, минимизирующие суммарные затраты на обеспечение требуемого повышения регионального УБ;
- обеспечить достоверность отчетной информации о состоянии СУБ предприятий на основе механизма инспекционных проверок.

Описав общую модель управления уровнем безопасности в регионе, перейдем к рассмотрению ряда конкретных экономических механизмов управления. При их анализе будем считать, что на территории региона расположено n предприятий и деятельность каждого предприятия приводит к риску неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

3.2. МЕХАНИЗМЫ ПЛАТЫ ЗА РИСК

Предположим, что для всех предприятий региона задано такое единое значение цены платы за риск λ^* , что при функционировании i -го предприятия и максимизации им своей прибыли

$$f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - \lambda^* x_i(u_i, v_i) - v_i,$$

где $u_i \geq 0$ – объем производства, v_i – затраты на мероприятия по снижению уровня риска, формируется уровень риска, равный $x_i(\lambda^*)$. Соответственно, уровень безопасности можно определить, например, как $[1 - x_i(\lambda^*)]$, а уровень безопасности в регионе X , при функционировании всех предприятий, находящихся на его территории, и при

условии, что риски предприятий не зависят друг от друга, определяется как $\prod_{i=1}^n [1 - x_i(\lambda^*)] = X$.

При действии механизма платы за риск i -е предприятие выплачивает сумму в размере $\lambda^* x_i(\lambda^*)$ за риск, связанный с его функционированием.

Суммарная плата за риск всех предприятий региона при этом равна $\lambda^* \sum_{i=1}^n x_i(\lambda^*) = Q_0$.

В случае, когда цена за риск λ изменяется в диапазоне от некоторого минимального значения λ_n до максимального значения λ_b , то справедливо следующее утверждение.

Утверждение 3.1. Если с ростом цены λ хотя бы на одном предприятии региона уменьшается плата за риск $\lambda x(\lambda)$, то для любой цены $\lambda^* \in [\lambda_n; \lambda_b]$, при которой уровень безопасности в регионе составляет величину X , а суммарная плата за риск всех предприятий региона равна Q_0 , всегда существует такой вектор цен $\{\lambda_i\}$, что уровень безопасности в регионе не уменьшается, а суммарная плата за риск падает.

Доказательство утверждения 3.1. Не ограничивая общности можно считать, что на первом предприятии региона с ростом цены уменьшается сумма платежа за риск, то есть

$$(1) \frac{\partial \lambda x_1(\lambda)}{\partial \lambda} < 0.$$

Для доказательства справедливости утверждения 3.1 необходимо показать, что существует такой вектор цен $\{\lambda_i\}$, что

$$\prod_{i=1}^n [1 - x_i(\lambda_i)] = P_1 \text{ и } \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i(\lambda_i) = Q_1, \text{ причем } P_1 \geq X, \text{ а } Q_1 < Q_0.$$

Пусть $\lambda_1 = \lambda^* + \Delta\lambda_1$, $\lambda_2 = \lambda^* + \Delta\lambda_2$, $\lambda_3 = \lambda^*$, $\lambda_4 = \lambda^*$, ..., $\lambda_n = \lambda^*$, тогда можно записать

$$P_1 = \prod_{i=1}^n [1 - x_i(\lambda_i)] = [1 - x_1(\lambda_1)] \times [1 - x_2(\lambda_2)] \times \prod_{i=3}^n [1 - x_i(\lambda^*)].$$

Если доказать, что существуют $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, такие, что $[1 - x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1)] \times [1 - x_2(\lambda^* + \Delta\lambda_2)] \geq [1 - x_1(\lambda^*)] \times [1 - x_2(\lambda^*)]$, то это будет соответствовать тому, что

$$(2) [1 - x_1(\lambda_1)] \times [1 - x_2(\lambda_2)] \times \prod_{i=3}^n [1 - x_i(\lambda^*)] \geq \prod_{i=1}^n [1 - x_i(\lambda^*)].$$

Так как $[1 - x_1(\lambda^*)]$ – возрастающая функция, то для любого $\Delta\lambda_1 > 0$ имеем $1 - x_1(\lambda) \leq 1 - x_1(\lambda + \Delta\lambda_1)$. Умножив это неравенство на $[1 - x_2(\lambda)]$, получим: $[1 - x_1(\lambda)] [1 - x_2(\lambda)] \leq [1 - x_1(\lambda + \Delta\lambda_1)] [1 - x_2(\lambda)]$.

Отсюда следует: $1 - x_2(\lambda^*) \geq \frac{[1 - x_1(\lambda^*)] \times [1 - x_2(\lambda^*)]}{1 - x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1)}$. Так как $1 -$

$x_2(\lambda^*)$ – непрерывная, возрастающая функция, то можно выбрать $\Delta\lambda'_2 > 0$ такое, что $1 - x_2(\lambda^* - \Delta\lambda'_2) \geq \frac{[1 - x_1(\lambda^*)] \times [1 - x_2(\lambda^*)]}{1 - x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1)}$.

Отсюда получаем:

$$[1 - x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1)] \times [1 - x_2(\lambda^* - \Delta\lambda'_2)] \geq [1 - x_1(\lambda^*)] \times [1 - x_2(\lambda^*)],$$

то есть неравенство (2) выполняется. Теперь надо доказать справедливость неравенства

$$(3) \sum_{i=1}^n \lambda x_i(\lambda_i) < \lambda^* \sum_{i=1}^n x_i(\lambda^*).$$

Перепишем (3) в виде

$$\lambda_1 x_1(\lambda_1) + \lambda_2 x_2(\lambda_2) + \lambda^* \sum_{i=3}^n x_i(\lambda_i) < \lambda^* x_1(\lambda^*) + \lambda^* x_2(\lambda^*) + \lambda^* \sum_{i=3}^n x_i(\lambda^*).$$

Для доказательства (3) достаточно показать, что

$$\lambda_1 x_1(\lambda_1) + \lambda_2 x_2(\lambda_2) < \lambda^* x_1(\lambda^*) + \lambda^* x_2(\lambda^*).$$

Из условия (1) следует, что для $\Delta\lambda_1 > 0$ справедливо неравенство

$$\lambda^* x_1(\lambda^*) > (\lambda^* + \Delta\lambda_1) x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1).$$

Обозначим через Δ разность

$$(4) \Delta = \lambda^* x_1(\lambda^*) - (\lambda^* + \Delta\lambda_1) x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1).$$

Очевидно, что $\Delta > 0$. Так как $x_2(\lambda)$ – непрерывная функция, то $\lambda x_2(\lambda)$ также непрерывная функция. А для непрерывной функции всегда можно подобрать такое $\Delta\lambda''_2 > 0$, что справедливо неравенство

$$(5) (\lambda^* - \Delta\lambda''_2) x_2(\lambda^* - \Delta\lambda''_2) - \lambda^* x_2(\lambda^*) < \Delta.$$

Подставляя в (5) значение ΔW из (4), получаем

$$\lambda^* x_1(\lambda^*) - (\lambda^* + \Delta\lambda_1) x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1) > (\lambda^* - \Delta\lambda''_2) x_2(\lambda^* - \Delta\lambda''_2) - \lambda^* x_2(\lambda^*)$$

или

$$(\lambda^* + \Delta\lambda_1)x_1(\lambda^* + \Delta\lambda_1) + (\lambda^* - \Delta\lambda_2)x_2(\lambda^* - \Delta\lambda_2) < \lambda^*x_1(\lambda^*) + \lambda^*x_2(\lambda^*).$$

То есть (3) для $\Delta\lambda_2'' > 0$ справедливо.

Если выбрать значение $\Delta\lambda_2$ из условия $\Delta\lambda_2 = \min \{ \Delta\lambda_2', \Delta\lambda_2'' \}$, то одновременно будут выполняться неравенства (2) и (3). Утверждение 3.1 доказано.

Аналогично доказывается соответствующее утверждение для ожидаемого ущерба:

Утверждение 3.2. Если с ростом цены λ хотя бы на одном предприятии региона уменьшается плата за риск $\lambda x(\lambda)$, то для любой цены $\lambda^* \in [\lambda_n, \lambda_b]$, при которой ожидаемый ущерб в регионе составляет величину $E W$, а суммарная плата за риск всех предприятий региона равна Q_0 , всегда существует такой вектор цен $\{\lambda_i\}$, что ожидаемый ущерб в регионе не увеличивается, а суммарная плата за риск падает.

В продолжение примеров главы 2, рассмотрим пример, когда в регионе расположены два предприятия. При этом $r_1=20$, $q_1=200$, $c_1=80$, $w_1=0,01$, $\theta_{01}=0,8$ и $T_1=1500$, а $r_2=40$, $q_2=180$, $c_2=120$, $w_2=0,01$, $\theta_{02}=1,2$ и $T_2=1000$. Пусть для этих предприятий установлена единая цена платы за риск $\lambda^*=80000$. Показатели функционирования первого и второго предприятий представлены в Табл. 9.

Табл. 9.

Показатель	1-е предприятие	2-е предприятие	Регион
Объем выпуска	223,39	332,56	
Величина средств на снижение уровня риска	4565,49	6831,76	11397,25
Уровень риска	0,0883	0,1073	
Уровень безопасности	0,9117	0,8927	0,8138
Плата за риск	7064,30	8586,74	15651,04
Прибыль	1746,41	8600,38	10346,79

Пусть теперь для первого предприятия цена платы за риск установлена в размере $\lambda_1 = 80300$, а для второго предприятия цена платы за риск установлена в размере $\lambda_2 = 79450$. Тогда показатели функционирования этих предприятий принимают значения, представленные в Табл. 10.

Табл. 10.

Показатель	1-е предприятие	2-е предприятие	Регион
Объем выпуска	221,81	333,43	
Величина средств на снижение уровня риска	4537,47	6819,65	11357,12
Уровень риска	0,0875	0,1080	
Уровень безопасности	0,9125	0,8920	0,8139
Плата за риск	7027,48	8579,44	15606,92
Прибыль	1720,04	8659,59	10379,63

Из сравнения данных, содержащихся в Табл. 9 и Табл. 10, следует, что при замене общей цены платы за риск $\lambda^* = 80000$ на дифференцированные цены $\lambda_1 = 80300$ и $\lambda_2 = 79450$, общая величина средств, выделяемых предприятиями на снижение уровня риска, уменьшилась. При этом вырос уровень безопасности региона, сократилась суммарная плата предприятий за риск, и одновременно с этим возросла суммарная прибыль предприятий.

3.3. МЕХАНИЗМЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА

Рассмотрим ситуацию, когда в регионе действует механизм сильных штрафов, функционируют n предприятий, и средства централизованного фонда R_0 распределяются между ними. Прибыль i -го предприятия определяется как

$$(1) f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - v_i - \begin{cases} \chi, & \text{если } y_i > x_i \\ 0, & \text{если } y_i \leq x_i \end{cases}$$

где y_i – уровень риска на i -ом предприятии, x_i – предельно допустимый уровень риска для i -го предприятия.

Первоначально для всех предприятий устанавливается единый предельно допустимый уровень риска x . Для того чтобы получить средства из централизованного фонда, предприятия сообщают в центр планируемые объемы выпуска s_i и планируемые объемы собственных средств g_i , предназначенных для снижения уровня риска.

В силу того, что действует механизм сильных штрафов, на планируемые объемы выпуска и средства на снижение уровня риска накладываются ограничения (см. разделы 2.1 и 2.2)

$$\frac{w_i s_i^2}{w_i s_i^2 + p_i g_i + T_i} \leq x.$$

Фактически это означает, что, определив значение g_i , предприятие может рассчитать s_i в соответствии с выражением

$$(2) \quad s_i = \sqrt{\frac{(g_i p_i + T_i)x}{(1-x)w_i}}.$$

На основе полученной информации о планируемых расходах g_i центр распределяет ресурс R_0 в соответствии с процедурой

$$V_i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^n g_j} R_0.$$

Так как при пропорциональном распределении больше получает то предприятие, которое больше заявляет, то центр таким образом стремится стимулировать предприятия к тому, чтобы они направляли больше средств на снижение уровня риска.

Информация об объемах выпуска требуется центру для того, чтобы для каждого предприятия определить предельный уровень риска

$$(3) \quad x_i(g_i) = \frac{w_i s_i^2}{w_i s_i^2 + p_i(V_i + g_i) + T_i}.$$

После того как для i -го предприятия рассчитано значение x_i , предприятие определяет объем выпуска u_i и объем средств v_i таким образом, чтобы его прибыль (1) была наибольшей. То есть, задача максимизации прибыли записывается в виде

$$\begin{cases} c_i u_i - \frac{1}{2} r_i q_i \left(\frac{u_i^2}{q_i^2} + 1 \right) - v_i \rightarrow \max, \\ \frac{w_i u_i^2}{w_i u_i^2 + p_i (v_i + V_i) + T_i} = x_i. \end{cases}$$

Решение этой задачи имеет вид

$$u_i = \frac{p_i q_i c_i x_i}{2 q_i w_i (1 - x_i) + r_i p_i x_i},$$

$$v_i = \frac{u_i}{2} \left(c_i - \frac{r_i}{q_i} u_i \right) - \frac{T_i}{p_i} - V_i.$$

Прибыль i -го предприятия в этом случае записывается как

$$f_i(g) = \frac{1}{2} \frac{p_i q_i c_i^2 x_i}{2 q_i w_i (1 - x_i) + r_i p_i x_i} + \frac{T_i}{p_i} + V_i - \frac{1}{2} r_i q_i,$$

где $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$.

Прибыль каждого предприятия зависит от значений $\{g_i\}$, которые сообщаются в центр всеми предприятиями. Влияние информации, сообщаемой предприятием, на получаемую прибыль определяется выражением

$$\frac{\partial f_i}{\partial g_i} = \frac{1}{2} p_i q_i c_i^2 \frac{2 q_i w_i}{[2 q_i w_i (1 - x_i) + p_i x_i]^2} \frac{\partial x_i}{\partial g_i} + \frac{\partial V_i}{\partial g_i}.$$

Нетрудно убедиться, что $\frac{\partial x_i}{\partial g_i} > 0$ и $\frac{\partial V_i}{\partial g_i} > 0$, и, следовательно,

предприятиям выгодно максимально увеличивать планируемый объем средств на снижение уровня риска.

Утверждение 3.3. Если для предприятий региона не ввести ограничения на планируемый объем средств на снижение уровня риска, то предельно допустимый уровень риска x_i , определяемый для каждого предприятия индивидуально, в пределе стремится к первоначально установленному единому предельно допустимому уровню риска x .

Доказательство утверждения 3.3. Из (3) получаем:

$$(4) \quad x_i(g) = \frac{\left(p_i + \frac{T_i}{g_i}\right)x}{\left(p_i + \frac{T_i}{g_i}\right)x + \left[p_i \left(\frac{R}{\sum_{j=1}^n g_j} + 1\right) + \frac{T_i}{g_i}\right](1-x)}.$$

Предел $\lim_{g_i \rightarrow \infty} x_i(g) = x$, то есть предельно допустимый уровень риска x_i , определяемый для каждого предприятия индивидуально, при стремлении предприятий увеличить планируемые объемы средств на снижение уровня риска мало отличается от первоначально установленного уровня. Утверждение 3.3 доказано.

Таким образом, несмотря на то, что центр израсходовал фонд в размере R_0 на финансирование снижения уровня риска, предельно допустимый уровень риска для каждого предприятия региона не уменьшился по отношению к первоначально установленному.

Однако, если центр введет ограничения для предприятий на планируемый объем средств на снижение уровня риска, то он может добиться определенного эффекта. Действительно, пусть G_0 – максимальный объем средств, который может запланировать предприятие, тогда для $g_i = G_0$, $i = 1, 2, \dots, n$ выражение (4) можно переписать в виде $x_i(g) = \frac{(p_i G_0 + T_i)x}{p_i \frac{R}{n}(1-x) + G_0 p_i + T_i}$, а так как $\frac{\partial x_i}{\partial G_0} > 0$, то отсюда

следует, что чем меньше максимальный объем средств, который может запланировать предприятие на снижение уровня риска, тем меньше будет индивидуально назначаемый максимально допустимый уровень риска для предприятия.

3.4. МЕХАНИЗМЫ КОМПЕНСАЦИИ ЗАТРАТ НА СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ РИСКА

Принципиальное отличие механизма финансирования мероприятий на снижение уровня риска от механизма компенсации затрат заключается в следующем. При действии механизма финансирования средства на снижение уровня риска поступают на предприятие

до того, как соответствующие мероприятия были проведены, в то время как механизм компенсации включается после того, как мероприятия по снижению уровня риска уже были проведены.

Будем считать, что центр осуществляет компенсацию предприятиям, распределяя между ними фонд R_0 . Пусть этот фонд распределяется пропорционально средствам, которые выделяют сами предприятия на снижение уровня риска, то есть

$$(1) V_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} R.$$

Если $V_i < v_i$ – это частичная компенсация, если $V_i = v_i$ – это полная компенсация, а если $V_i > v_i$ – это полная компенсация со стимулированием.

При действии рассматриваемого механизма прибыль i -го предприятия может быть представлена в виде

$$f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - v_i + \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} R_0.$$

Для максимизации своей прибыли i -е предприятие определяет объем выпуска и объем средств на снижение уровня риска из решения задачи

$$(2) c_i u_i - z_i(u_i) + \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} R_0 - v_i \rightarrow \max_{(u_i, v_i)}.$$

Объем средств на снижение уровня риска определяется из решения задачи

$$\frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} R_0 - v_i \rightarrow \max,$$

которое записывается в виде $v_i = \sqrt{\sum_{j \neq i}^n v_j} \left(\sqrt{R_0} - \sqrt{\sum_{j \neq i}^n v_j} \right)$.

В ситуации равновесия по Нэшу [50], объем средств, выделяемых предприятием на снижение риска, будет определяться как

$$v_i = \frac{n-1}{n^2} R_0.$$

Отсюда следует, что размер средств, которые поступают на предприятие из фонда, равен $V_i = \frac{R_0}{n}$. То есть, эти средства не только покрывают расходы предприятия, но и увеличивают его прибыль на величину $V_i - v_i = \frac{R_0}{n^2}$.

Если бы средства в фонде отсутствовали, то есть $R_0 = 0$, то уровень риска, связанный с деятельностью i -го предприятия, определялся бы выражением (см. выражение (2.1.9)):

$$x_i(u_i^*, 0) = \frac{\omega(u_i^*)}{\omega(u_i^*) + T_i},$$

соответственно, уровень риска для случая, когда $R_0 \neq 0$, определяется как

$$x_i\left(u_i^*, \frac{n-1}{n^2} R_0\right) = \frac{\omega(u_i^*)}{\omega(u_i^*) + \theta\left(\frac{n-1}{n^2} R_0\right)}.$$

Таким образом, использование средств из фонда R_0 в соответствии с процедурой (1) для компенсации затрат предприятий на снижение уровня риска уменьшает уровень риска на величину

$$x_i(u_i^*, 0) - x_i\left(u_i^*, \frac{n-1}{n^2} R_0\right) = \frac{\omega(u_i^*) \times \left[\theta\left(\frac{n-1}{n^2} R_0\right) - T_i \right]}{\left[\omega(u_i^*) + T_i \right] \times \left[\omega(u_i^*) + \theta\left(\frac{n-1}{n^2} R_0\right) \right]}.$$

Отметим, что объем выпуска продукции на предприятиях не изменяется при увеличении фонда R_0 . Если же потребовать, чтобы размер компенсации не превышал потраченных предприятием средств, то этот механизм, без использования механизмов контроля уровня риска, не приведет к уменьшению уровня риска в регионе.

3.5. МЕХАНИЗМЫ ПРОДАЖИ КВОТ НА УРОВЕНЬ РИСКА

При действии этого механизма центр должен обеспечить уровень безопасности в регионе равный X . Когда в регионе функционируют n предприятий, и УБ, связанный с деятельностью i -го предпри-

тия, равен $(1 - x_i)$, а УБ всего региона определяется как $\prod_{i=1}^n (1 - x_i)$, то общий объем квот, который центр может продать предприятиям, определяется из условия

$$\prod_{i=1}^n (1 - x_i) = X.$$

Для продажи квот центр назначает цену продаж λ , затем предприятия рассчитывают размер квот, которые они хотели бы купить по этой цене. Один из вариантов определения размера заявок заключается в следующем. Сначала решается задача (2) предыдущего раздела и находятся значения u_i^* и v_i^* , которые обеспечивают получение максимальной прибыли предприятию в случае, когда за квоту равную x_i предприятие должно заплатить сумму в размере λx_i . После этого рассчитывается размер заявки $s_i = x_i(u_i^*, v_i^*)$. Эта заявка сообщается в центр. Если оказывается, что $\prod_{i=1}^n (1 - s_i) \geq X$, то центр продает каждому предприятию квоту в размере

$$(1) x_i = s_i.$$

Если же

$$(2) \prod_{i=1}^n (1 - s_i) < X,$$

то для определения размера квот центр определяет, во сколько раз продаваемая квота будет меньше запрашиваемой. Для этого центром решается задача

$$(3) \begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda a_i s_i \rightarrow \max_{\{a_i\}} \\ \prod_{i=1}^n (1 - a_i s_i) = X, \\ 0 < a_i \leq 1. \end{cases}$$

Последнее неравенство означает, что при заданной цене предприятию не может продаваться больший размер квоты, чем само предприятие запросило для себя. Другими словами, должно всегда выполняться условие $x_i \leq s_i$, или $a_i \leq 1$.

Аналитически задачу (3) решить сложно. Но если использовать последовательный алгоритм решения этой задачи, то можно получить аналитическое решение.

На первом шаге решается задача

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda a_i s_i \rightarrow \max_{\{a_i\}}, \\ \prod_{i=1}^n (1 - a_i s_i) = X. \end{cases}$$

Ее решение имеет вид $a_i^{(1)} = \frac{1}{s_i} \left(1 - X^{\frac{1}{n}} \right)$. Обозначим через Q

множество номеров предприятий находящихся в регионе, $Q_1 = \{i \in Q \mid a_i^{(1)} > 1\}$. Если $Q_1 = \emptyset$, то размер квоты, предназначенной

i -му предприятию будет равен $x_i = a_i^{(1)} s_i = 1 - X^{\frac{1}{n}}$. Если же $Q_1 \neq \emptyset$, то для всех $i \in Q_1$, размер квоты определяется выражением (1). Очевидно, что $Q \neq Q_1$, иначе не выполнялось бы условие (2).

Второй шаг. Пусть m_1 – количество элементов, содержащихся во множестве Q_1 . Тогда для оставшихся $(n - m_1)$ предприятий задачу определения квот следует записывать в виде

$$\begin{cases} \sum_{i \in Q \setminus Q_1} \lambda a_i s_i \rightarrow \max_{\{a_i\}} \\ \prod_{i \in Q \setminus Q_1} (1 - a_i s_i) = \frac{X}{\prod_{i \in Q_1} (1 - s_i)}. \end{cases}$$

Решение этой задачи имеет вид $a_i^{(2)} = \frac{1}{s_i} \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i \in Q_1} (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n - m_1}} \right]$.

Обозначим $Q_2 = \{i \in Q \mid a_i^{(2)} > 1\}$, тогда если $Q_2 = \emptyset$, то размер квоты, предназначенной i -му предприятию для $i \in Q \setminus Q_1$, будет равен

$$x_i = 1 - \left(\frac{X}{\prod_{i \in Q_1} (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n - m_1}}.$$

Если же $Q_2 \neq \emptyset$, то для всех $i \in Q_2$, размер квоты определяется выражением (1).

Третий шаг. Пусть m_2 — количество элементов, содержащихся в множестве Q_2 . Тогда для оставшихся $(n - m_1 - m_2)$ предприятий задачу определения квот следует записывать в виде

$$\begin{cases} \sum_{i \in Q \setminus [Q_1 \cup Q_2]} \lambda a_i s_i \rightarrow \max_{\{a_i\}} \\ \prod_{i \in Q \setminus [Q_1 \cup Q_2]} (1 - a_i s_i) = \frac{X}{\prod_{i \in Q_1 \cup Q_2} (1 - s_i)}. \end{cases}$$

Решение этой задачи имеет вид

$$a_i^{(3)} = \frac{1}{s_i} \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i \in Q_1 \cup Q_2} (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n - m_1 - m_2}} \right].$$

Теперь определяется множество $Q_3 = \{i \in Q \mid a_i^{(3)} > 1\}$, и так далее. Итерации продолжаются до тех пор, пока не получим $Q_k = \{i \in Q \mid a_i^{(k)} > 1\} = \emptyset$.

Таким образом, решение поставленной задачи записывается следующим образом.

Для $i \in Q \setminus [Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_{k-1}]$

$$a_i = \frac{1}{s_i} \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{j \in Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_{k-1}} (1 - s_j)} \right)^{\frac{1}{n - m_1 - m_2 - \dots - m_{k-1}}} \right],$$

и, соответственно,

$$x_i = 1 - \left(\frac{X}{\prod_{i \in Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_{k-1}} (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n - m_1 - m_2 - \dots - m_{k-1}}}.$$

Для $i \in Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_{k-1}$ $a_i = 1$ и, соответственно, $x_i = s_i$.

Утверждение 3.4. Результат, полученный с помощью последовательного алгоритма, является решением задачи (3).

Доказательство утверждения 3.4. Обозначим

$\hat{Q} = Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_{k-1}$ и предположим, что все заявки на квоты упорядочены по возрастанию, то есть $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_n$, и существует такое j , что $j \in \hat{Q}$, а $(j+1) \notin \hat{Q}$. В этом случае для $i \leq j$ $x_i = s_i$, а для $i > j$

$$x_i = 1 - \left(\frac{X}{\prod_{i=1}^j (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n-j}},$$

и

$$\sum_{i=1}^n a_i s_i = \sum_{i=1}^j s_i + (n-j) \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i=1}^j (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n-j}} \right].$$

Пусть \hat{a}_i – решение задачи (3), и это решение не совпадает с результатом, полученным с помощью последовательного алгоритма. Тогда должно выполняться неравенство

$$\sum_{i=1}^n \hat{a}_i s_i > \sum_{i=1}^j s_i + (n-j) \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i=1}^j (1 - s_i)} \right)^{\frac{1}{n-j}} \right].$$

Перепишем это неравенство в виде

$$(4) \sum_{i=1}^j \hat{a}_i s_i + \sum_{i=j+1}^n \hat{a}_i s_i > \sum_{i=1}^j s_i + (n-j) \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i=1}^j (1-s_i)} \right)^{\frac{1}{n-j}} \right].$$

Так как по условию задачи $\hat{a}_i \leq 1$, то $\sum_{i=1}^j \hat{a}_i s_i \leq \sum_{i=1}^j s_i$, поэтому, для того чтобы выполнялось неравенство (4), должно быть справедливо соотношение

$$\sum_{i=j+1}^n \hat{a}_i s_i \geq (n-j) \left[1 - \left(\frac{X}{\prod_{i=1}^j (1-s_i)} \right)^{\frac{1}{n-j}} \right],$$

или

$$(5) \sum_{i=j+1}^n \hat{a}_i s_i \geq (n-j) \left[1 - \left(\prod_{i=j+1}^n (1-s_i) \right)^{\frac{1}{n-j}} \right].$$

Но, если справедливо неравенство (5), тогда всегда должно быть справедливо неравенство

$$\sum_{i=j+1}^n s_i \geq (n-j) \left[1 - \left(\prod_{i=j+1}^n (1-s_i) \right)^{\frac{1}{n-j}} \right].$$

Перепишем это неравенство в виде

$$\left(\prod_{i=j+1}^n (1-s_i) \right)^{\frac{1}{n-j}} \geq 1 - \frac{\sum_{i=j+1}^n s_i}{n-j}.$$

Обозначая $t_i = 1 - s_i$, получим

$$(6) \left(\prod_{i=j+1}^n t_i \right)^{\frac{1}{n-j}} \geq \frac{\sum_{i=j+1}^n t_i}{n-j}.$$

Итак, корень $(n-j)$ -й степени из произведения $(n-j)$ чисел больше или равен среднему арифметическому этих чисел. Причем все эти числа положительные, то есть $t_i > 0$. Но из неравенства Коши [63] следует, что среднее арифметическое $(n-j)$ положительных чисел больше или равно корня $(n-j)$ -й степени из произведения этих чисел, то это соответствует тому, что неравенство (6) выполняться не может. Отсюда следует, что не может выполняться и неравенство (5). А если не выполняется неравенство (5), то это значит, что результат, полученный с помощью последовательного алгоритма, совпадает с решением задачи (3). Утверждение 3.4 доказано.

Рассмотрим следующий пример. Пусть в регионе функционируют восемь предприятий, и для всех них справедливо (2.1.19) и (2.1.20), тогда при назначенной центром цене λ заявка i -го предприятия на квоту определяется выражением

$$(7) s_i = q_i \sqrt{\frac{w_i}{\lambda}} \frac{2\sqrt{\lambda w_i} - c_i \sqrt{\theta_0}}{2w_i q_i - \theta_0 r_i}.$$

Для значений параметров, представленных в Табл. 11. и цене $\lambda = 10000$, заявки на квоты, рассчитанные в соответствии с (7), представлены в Табл. 12.

Табл. 11

Предприятие Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
w	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012
θ_0	0,8	0,69	0,84	0,75	0,86	0,89	0,85	0,95
c	60	70	70	80	80	90	100	110
r	20	22	24	26	28	30	35	35
q	190	171	150	130	140	90	80	70
T	1000	1000	1100	1100	1200	1200	1300	1300

Табл. 12

Предприятие	1	2	3	4	5	6	7	8
заявка (10^{-1})	0,194	0,206	0,181	0,200	0,209	0,202	0,204	0,253

Предположим, что уровень безопасности, который должен быть обеспечен в регионе, равен $X = 0,85$. Тогда из первого этапа последовательного алгоритма следует, что каждому предприятию выделяется квота в размере $x_i = 1 - \sqrt[8]{0,85} = 0,0201$, $i = 1, 2, \dots, 8$. Но, заявки первого, третьего и четвертого предприятий меньше выделенных квот, поэтому они выкупают ровно столько квот, сколько заявляли и обеспечивают уровень безопасности равный

$$(1 - 0,0194) \times (1 - 0,0181) \times (1 - 0,02) = 0,9435.$$

Отсюда следует, что деятельность остальных пяти предприятий должна обеспечить уровень безопасности не меньший чем

$$\frac{0,85}{0,9435} = 0,9009.$$

Из второго этапа последовательного алгоритма следует, что второму, пятому, шестому, седьмому и восьмому предприятиям выделяется квота в размере $x_i = 1 - \sqrt[5]{0,9009} = 0,0207$, $i = 2, 5, 6, 7, 8$. А, так как заявки второго, шестого и седьмого предприятий меньше выделенных квот, поэтому они также будут выкупать ровно столько квот, сколько заявляли. Таким образом, если будут удовлетворены заявки на покупку квот всех предприятий, кроме пятого и восьмого, то их деятельность обеспечит уровень безопасности равный

$$(1 - 0,0194) \times (1 - 0,0206) \times (1 - 0,0181) \times (1 - 0,02) \times \\ \times (1 - 0,0202) \times (1 - 0,0204) = 0,8869.$$

Соответственно деятельность пятого и восьмого предприятий должна обеспечить уровень безопасности не меньший чем

$$\frac{0,85}{0,8869} = 0,9584.$$

Третий этап последовательного алгоритма показывает, что пятому и восьмому предприятиям выделяется квота в размере $x_i = 1 - \sqrt[2]{0,9584} = 0,021$, $i = 5, 8$.

То есть, заявка пятого предприятия также может быть полностью удовлетворена. В этом случае деятельность первых семи предприятий обеспечит уровень безопасности в регионе равный

$$(1 - 0,0194) \times (1 - 0,0206) \times (1 - 0,0181) \times (1 - 0,02) \times (1 - 0,0209) \times \\ \times (1 - 0,0202) \times (1 - 0,0204) = 0,8683.$$

Поэтому восьмому предприятию будет выделена квота в размере $x_8 = 1 - \frac{0,85}{0,8683} = 0,0211$. Таким образом, всем предприятиям,

кроме восьмого, продается такой размер квот, который они запросили, а восьмому предприятию квота уменьшена.

3.6. МЕХАНИЗМЫ СТРАХОВАНИЯ

Если в [23] и в разделе 2.5 настоящей работы рассматривались задачи исследования манипулируемости механизмов принятия решений, используемых в экологическом страховании (механизмы взаимного страхования, скидок и т.д.), то в настоящем разделе основной акцент будет делаться на изучении в рамках моделей страхования механизмов управления, побуждающих страхователей (предприятия региона) выбирать определенные действия. Соответствующий обширный класс механизмов в теории управления организационными системами получил название *механизмов стимулирования* [98]. В частности, в настоящем разделе исследуется роль экологического страхования в побуждении страхователей к выбору действий, приводящих к снижению вероятностей наступления страхового случая, ожидаемых потерь и т.д., а также к увеличению затрат на предупредительные мероприятия.

Предупредительная и мотивационная роль страхования. Рассмотрим модель взаимодействия страховщика с одним страхователем, о котором первый имеет всю необходимую информацию. Пусть деятельность страхователя описывается: его действием $u \geq 0$, которое в зависимости от контекста может интерпретироваться как объем производимой страхователем продукции, оказываемых услуг и т.д., и суммой $v \geq 0$, затрачиваемой страхователем на предупредительные (и природоохранные) мероприятия. От действия страхователя зависит его доход $H(u)$, затраты $z(u)$ и вероятность наступления страхового случая $p(v, u)$, причем последняя величина зависит также и от объема средств v , затрачиваемых на предупредительные мероприятия, то есть:

$$(1) \quad E f(v, u) = H(u) - z(u) - v - \kappa(v, u) + p(v, u) [(1 + \xi) V(v, u) - W],$$

где параметр $\xi \geq 0$ отражает степень несклонности страхователя к риску [23, 177], $\kappa(\cdot)$ – страховой взнос, $V(\cdot)$ – страховое возмещение, W – ущерб страхователя от наступления страхового случая.

Так как нас интересуют свойства механизмов страхования, а не «производственная» деятельность страхователя, то выберем простейшие зависимости затрат и дохода от его действия: $H(y) = c u$,

$z(u) = z_0 + \alpha_0 u$, где c может интерпретироваться как цена, по которой страхователь реализует свою продукцию, z_0 – постоянные издержки, α_0 – удельные переменные издержки. Из условия $H(u) - z(u) - v \geq 0$ можно определить точку безубыточности $u_0(v)$ – минимальный объем производства, при котором деятельность страхователя еще выгодна: $u_0(v) = (z_0 + v) / (c - \alpha_0)$.

Относительно зависимости вероятности наступления страхового случая от u и v предположим, что: $p'_u \geq 0$, $p'_v \leq 0$, $p''_{uu} \leq 0$, $p''_{vv} \geq 0$.

В отсутствие страхования целевая функция страхователя равна (2) $E f(v, u) = H(u) - z(u) - v - p(v, u) W$.

Следовательно, без учета ограничения безубыточности оптимальной стратегией страхователя будет выбор (v^*, u^*) :

$$(3) \begin{cases} \frac{\partial p(v^*, u^*)}{\partial u} = \frac{\beta_0}{W}, \\ \frac{\partial p(v^*, u^*)}{\partial v} = -\frac{1}{W}. \end{cases}$$

где $\beta_0 = c - \alpha_0$. Рассмотрим следующий пример, иллюстрирующий данные зависимости.

Пример 3.6.1. Пусть $p(v, u) = e^{-k_v v} (1 - e^{-k_u u})$, где k_v и k_u – положительные константы. Решая уравнения (3), получим:

$$v^* = \frac{1}{k_v} \ln \frac{W k_u k_v}{k_u + \beta_0 k_v}, y^* = \frac{1}{k_u} \ln \left(1 + \frac{k_u}{\beta_0 k_v} \right).$$

Ожидаемые потери $E W$ при этом равны $1 / K_v$.²⁸

В присутствии страхования, если осуществляется полная компенсация ущерба, то есть $V = W / (1 + \xi)$, то без учета ограничения безубыточности оптимальной стратегией страхователя будет выбор (v^*, u^*) :

$$(4) \begin{cases} \frac{\partial k(v^*, u^*)}{\partial u} = \beta_0, \\ \frac{\partial k(v^*, u^*)}{\partial v} = -1. \end{cases}$$

²⁸ Символ «•» здесь и далее обозначает окончание примера.

Если $\xi_0(v, u)$ – нагрузка к нетто-ставке страхования [23], и имеет место

$$(5) \kappa(v, u) = \frac{\xi_0(v, u) + p(v, u)}{1 + \xi} W,$$

то (4) примет вид

$$(6) \begin{cases} \xi'_{0u}(v^*, u^*) + p'_u(v^*, u^*) = \frac{\beta_0(1 + \xi)}{W}, \\ \xi'_{0v}(v^*, u^*) + p'_v(v^*, u^*) = -\frac{1 + \xi}{W}. \end{cases}$$

В рамках рассматриваемой модели стратегией страховщика является выбор зависимости $\xi_0(\cdot)$ нагрузки к нетто-ставке²⁹ от затрат на предупредительные мероприятия и действий страхователя.

Несколько забегаая вперед, отметим, что сравнение свойств систем уравнений (3) и (6) является ключевым инструментом анализа предупредительных и мотивационных свойств экологического страхования.

Под *предупредительной ролью страхования* будем понимать его свойство побуждать страхователей увеличивать отчисления на предупредительные мероприятия. Под *мотивационной ролью страхования* будем понимать его свойство побуждать страхователей выбирать действия, снижающие «ущерб» от наступления страховых случаев (каждый раз при рассмотрении тех или иных моделей страхования необходимо конкретизировать – что понимается под «ущербом» – вероятность наступления страхового случая, ожидаемые потери, ожидаемые потери с учетом затрат на страхование и предупредительные мероприятия и т.д.).

Следующее утверждение констатирует, что при постоянной нагрузке страхование не играет ни предупредительной, ни мотивационной роли, а, наоборот, побуждает страхователя выбирать стратегии, увеличивающие ожидаемые потери по сравнению с ожидаемыми потерями в отсутствие страхования.

²⁹ В экологическом страховании нагрузка к нетто-ставке включает рисковую, коммерческую и предупредительную нагрузки. Для простоты в первом приближении можно считать, что ξ_0 – предупредительная нагрузка, характеризующая объем средств (точнее долю от страховых платежей), направляемых страховщиком на проведение предупредительных мероприятий.

Утверждение 3.5. Если $\xi_0 = \text{Const}$, то $u^* \leq u^*$, $v^* \leq v^*$.

Доказательство утверждения 3.5. Если $\xi_0 = \text{Const}$, то (6) примет вид:

$$(7) \begin{cases} p'_u(v^*, u^*) = \frac{\beta_0(1 + \xi)}{W}, \\ p'_v(v^*, u^*) = -\frac{1 + \xi}{W}. \end{cases}$$

Сравнивая (3) и (7) с учетом свойств зависимости³⁰ $p(\cdot)$ и того, что $\xi \geq 0$, получаем, что $u^* \leq u^*$, $v^* \leq v^*$. Утверждение 3.5 доказано.

Пример 3.6.2. Решая уравнения (7) для данных примера 3.6.1, получим, что введение страхования приведет к тому, что страхователь выберет то же действие, что и в отсутствие страхования, но уменьшит отчисления на предупредительные мероприятия:

$$v^* = v^* - \frac{1}{k_v} \ln(1 + \xi) \leq v^*, \quad u^* = \frac{1}{k_u} \ln\left(1 + \frac{k_u}{\beta_0 k_v}\right) = u^*.$$

Ожидаемые потери при этом равны $(1 + \xi)/k_v$, то есть возрастают в $(1 + \xi)$ раз по сравнению со случаем отсутствия страхования³¹ (см. пример 3.6.1).

На Рис. 41 на плоскости переменных (u, v) изображено множество стратегий, допустимых с точки зрения ограничения безубыточности, а также линии уровня функции $p(v, u)$ (направление возрастания отмечено стрелкой). Видно, что требования увеличения отчислений на предупредительные мероприятия и увеличения действий «противоречат» друг другу. Экологическое страхование является одним из инструментов «смягчения» этого противоречия. •

Важный качественный вывод, следующий из утверждения 3.5, заключается в том, что для того, чтобы страхование оказывало предупредительное и мотивационное воздействие на страхователя, параметры страхового контракта должны гибким образом зависеть от стратегий, выбираемых последним.

³⁰ Выше мы предположили, в том числе, вогнутость функции $p(\cdot)$ по действию страхователя. Результат утверждения 3.6.1 изменится, если предположить выпуклость (см. пример 3.6.3 ниже). В общем случае (если $p(\cdot)$ имеет точки перегиба и т.д.) нельзя однозначно утверждать что введение страхования всегда уменьшает или всегда увеличивает равновесные значения стратегий страхователя.

³¹ Данный вывод не должен шокировать, так как при страховании, в рамках введенных выше предположений, ожидаемые потери полностью компенсируются.

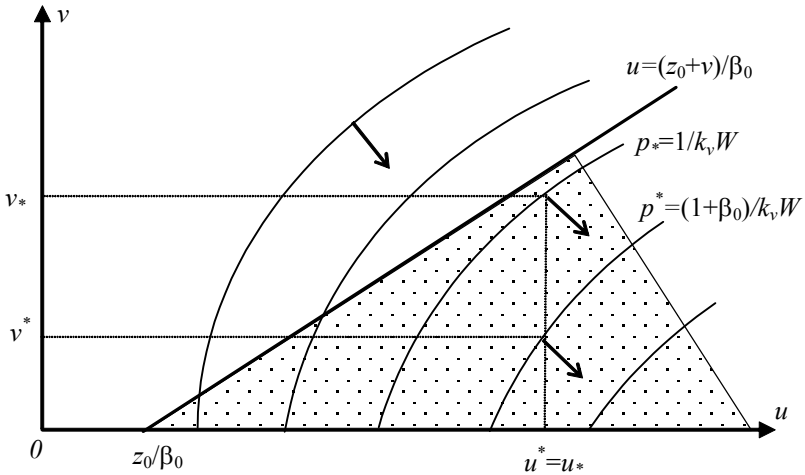


Рис. 41. Область допустимых стратегий и оптимальные стратегии страхователя для примеров 3.6.2 и 3.6.3

Кроме того, утверждение 3.5 является формальной иллюстрацией свойства *морального риска* – застрахованный субъект стремится избежать риска меньше, чем незастрахованный [172].

Анализ систем уравнений (3) и (7), а также графические интерпретации, приведенные на Рис. 41, подсказывают, что для того, чтобы страхование оказывало на страхователя предупредительное и мотивационное воздействие, необходимо, чтобы нагрузка к нетто-ставке и/или страховой тариф зависели от стратегий страхователя. Поэтому рассмотрим условия, которым должны удовлетворять параметры страхового контракта для обеспечения требуемого поведения страхователя. Для простоты будем рассматривать модели, в которых переменной является только одна из компонент стратегии страхователя – либо отчисления на предупредительные мероприятия, либо действие.

Пусть единственной переменной является величина отчислений v на предупредительные мероприятия (действие страхователя фиксировано). Тогда из (3) и (6) получаем:

$$(8) \quad p'_v(v_*) = -\frac{1}{W}, \quad \xi'_{0v}(v^*) + p'_v(v^*) = -\frac{1 + \xi}{W}.$$

Из (8) следует, что в силу введенных выше предположений для обеспечения $v^* \geq v_*$ необходимо выполнение следующего условия:

$$(9) \xi_{0v}'(\cdot) \leq -\frac{\xi}{W}.$$

Легко видеть, что, например, при $\xi_0(v) = \xi_0 - \xi v / W$ в силу (8) получаем $v^* = v_*$. Для обеспечения условий необходимости и достаточности следует вспомнить (см. [23]), что страхование будет взаимовыгодным, если выполнено следующее условие:

$$(10) \forall v \geq 0 \quad \xi_0(v) \leq \xi p(v).$$

В предельном случае (при выполнении (10) как равенства) получаем, что $v^* = v_*$, то есть введение страхования не изменяет отчислений на предупредительные мероприятия!

Аналогичным образом рассмотрим случай, когда единственной переменной является действие³² страхователя u , а величина отчислений на предупредительные мероприятия фиксирована. Тогда из (3) и (6) получаем:

$$(11) p_u'(u_*) = \frac{\gamma}{W}, \quad \xi_{0u}'(u^*) + p_y'(u^*) = \frac{(1 + \xi)\beta_0}{W}.$$

Из (11) следует, что в силу введенных выше предположений для обеспечения $v^* \geq v_*$ необходимо выполнение следующего «аналогичного» (10) условия:

$$(12) \xi_{0u}'(\cdot) \leq \frac{\xi\beta_0}{W}.$$

Легко видеть, что, например, при $\xi_0(u) = \xi \beta_0 u / W$ в силу (8) получаем $u^* = u_*$. Для обеспечения необходимости и достаточности

³² Если в случае переменных затрат на предупредительные мероприятия предупредительная функция экологического страхования заключалась в побуждении страхователя увеличивать эти затраты, то в случае переменных действий страхователя, в силу отмеченной выше «противоречивостью» между производственными и экологическими целями, в общем случае неясно, следует побуждать страхователя выбирать большие или меньшие действия. Для определенности предположим, что одна из целей страхования – побуждать страхователя снижать вероятность наступления страхового случая и, следовательно, снижать ожидаемые потери, за счет выбора меньших действий (например, за счет непревышения объемом производства некоторой критической величины). В примере 3.6.3 рассматривается противоположный случай – когда наличие фиксированной нагрузки при страховании побуждает страхователя выбирать большие действия, чем в отсутствие страхования.

следует вспомнить, что страхование будет взаимовыгодным, если выполнено следующее условие:

$$(13) \forall v \geq 0 \xi_0(u) \leq \xi p(u).$$

В предельном случае (при выполнении (13) как равенства) получаем, что $u^* = u_*$, то есть введение страхования не изменяет равновесных действий страхователя!

Отметим, что в силу (10) и (13), если оптимальное действие страхователя в отсутствие страхования принадлежало области безубыточности, то есть выполнялось: $u_* \geq u_0(v_*)$, то и при наличии страхования оптимальное действие страхователя также будет принадлежать области безубыточности, то есть будет иметь место: $u^* \geq u_0(v^*)$. Содержательно это свойство объясняется тем, что ожидаемые потери учитываются в целевой функции страхователя независимо от наличия или отсутствия страхования, а условия типа (10) и (13) являются «условиями участия» [172], отражающие выгодность страхования для страхователя (то есть условия того, что при заключении страхового контракта его ожидаемая полезность не уменьшится).

Суммируем полученные результаты, сформулировав их в виде следующего утверждения.

Утверждение 3.6. Предупредительная роль страхования имеет место, если выполнены условия (9)-(10). Мотивационная роль страхования имеет место, если выполнены условия (12)-(13). Если выполнено

$$(14) \xi_0(v, u) = \xi p(v, u),$$

то наличие страхования не изменяет действий страхователя и его отчислений на предупредительные мероприятия.

Приведем следующий пример, иллюстрирующий мотивационную роль экологического страхования (отметим, что в примере 3.6.3 не выполнено введенное выше предположение о том, что $p''_{uu} \leq 0$).

Пример 3.6.3. Пусть $u \in [0; u^+]$, $p(u) = (u / u^+)^2$. Вычисляем оптимальное действие u_* страхователя в отсутствие страхования (то есть действие, максимизирующее (2)): $u_* = u^+ \beta_0 / 2W$. При страховании с фиксированной нагрузкой к нетто-ставке оптимальное действие u^* страхователя в отсутствие страхования (то есть действие, максимизирующее (1)) будет $u^* = (1 + \xi) u^+ \beta_0 / 2W$.

Итак, при наличии страхования (и полной компенсации потерь!) страхователю выгодно выбирать большие действия, чем при отсутствии страхования: $u^* \geq u_*$. •

Завершив рассмотрение предупредительной и мотивационной роли страхования, перейдем к описанию результатов исследования специфики страхования в многоэлементных системах.

Специфика страхования в многоэлементных системах. В разделе 2.5 рассматривались механизмы страхования в многоэлементных системах (то есть в системах, состоящих из одного страховщика и нескольких страхователей), в которых страхователи были независимы. Независимость страхователей проявлялась в первую очередь в том, что вероятность наступления страхового случая у каждого страхователя зависела только от его собственных параметров и действий и не зависела от параметров и действий других страхователей.

На практике распространены ситуации, в которых вероятности наступления страховых случаев взаимозависимы. Примерами причин, обуславливающих такую взаимозависимость, являются: наличие технологических связей между страхователями, их территориальная близость и т.д. Для отражения «взаимодействия» между страхователями будем в формальных моделях, рассматриваемых в настоящем разделе, предполагать, что вероятность наступления страхового случая у каждого из n страхователей зависит от действий всех страхователей, то есть: $p_i = p_i(u)$, где $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ – вектор действий страхователей (выбираемых предприятиями объемов производства), $i \in Q = \{1, 2, \dots, n\}$.

Последовательность функционирования (порядок получения информации и выбора стратегий участниками системы – страховщиком и страхователями) будем предполагать следующим: страховщик предлагает каждому из страхователей заключить страховой контракт, в соответствии с которым страхователь делает взнос, зависящий от его действий (и в общем случае, быть может, от действий других страхователей) и при наступлении страхового случая получает полное возмещение ущерба; затем страхователи одновременно и независимо выбирают свои действия, в результате чего «определяются» вероятности наступления страховых случаев.

Специфика страхования в многоэлементных системах заключается в том, что страхователи, заключившие страховые контракты с одним страховщиком, оказываются вовлеченными в игру, в которой выигрыш каждого из них зависит не только от его собственных действий, но и от действий других страхователей [23, 29]. Следовательно, для прогноза выбираемых страхователями при заданных

страховых контрактах действий, страховщик должен «предсказать» их поведение, то есть определить равновесие игры страхователей.

Системы такого рода в теории управления организационными системами получили название систем с сильно связанными элементами. Общие результаты их теоретического исследования изложены в [98]. Основная идея управления в многоэлементных системах заключается в том, чтобы выбрать управляющие воздействия, *декомпозирующие игру* управляемых субъектов, то есть позволяющие управляющему органу эффективно предсказывать то состояние системы, в котором она окажется при данном управлении. Вторая задача – задача выбора управления, приводящего систему в состояние, наиболее предпочтительное с точки зрения управляющего органа, как правило, решается гораздо проще, чем задача декомпозиции [98]. Перейдем к описанию моделей страхования в многоэлементных системах.

Ожидаемая полезность i -го страхователя в отсутствие страхования может быть записана в виде³³:

$$(15) \quad E f_i(u) = c_i u_i - p_i(u) W_i, \quad i \in Q.$$

В качестве концепции решения игры выберем равновесие Нэша [50]. По определению вектор u_* – равновесие Нэша тогда и только тогда, когда:

$$(16) \quad \forall i \in Q \quad \forall u_i \quad E f_i(u_*) \geq E f_i(u_i, u_{*-i}),$$

где $u_{-i} = (u_1, u_2, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_n)$ – обстановка игры для i -го страхователя.

Если функция $p_i(\cdot)$ выпукла по u_i , то равновесие Нэша удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$(17) \quad p'_{i, u_i}(u_*) = c_i / W_i, \quad i \in Q.$$

³³ Для простоты в настоящем разделе мы не будем акцентировать внимание на постоянных издержках, затратах на предупредительные мероприятия и т.д., считая, что единственной стратегией страхователя является выбор действий, а его ожидаемая полезность, помимо ожидаемых потерь и слагаемых, отражающих взаимодействие со страховщиком, определяется ожидаемой прибылью, которая зависит от дохода, пропорционального действию i -го страхователя.

Пример 3.6.4. Пусть $p_i(u) = \left(\sum_{j \in Q} \alpha_{ij} u_j \right)^2 / 2r$. Обозначим

$\delta_i = \beta_{0i} r / W_i \alpha_{ii}$, $i \in Q$. Тогда из (17) получаем, что равновесие Нэша определяется как решение системы линейных уравнений

$$(18) \sum_{j \in Q} \alpha_{ij} u_{*j} = \delta_i, i \in Q.$$

Предположим, что имеются два страхователя, тогда, выбирая, например, численные значения $W_1 = W_2 = 1$, $r = 100$, $\beta_1 = 3 / 320$, $\beta_2 = 21 / 1600$, получаем: $u_{*1} = 1$, $u_{*2} = 2$, что приводит к следующим вероятностям наступления страховых случаев: $p_1(u^*) = 1 / 128$, $p_2(u^*) = 49 / 3200$. •

Пусть нагрузка к нетто-ставке ξ_i или страховой тариф π_i для каждого страхователя зависит от вектора действий всех страхователей, то есть:

$$(19) \xi_i(u) = \frac{\xi_{0i}(u) + p_i(u)}{1 + \xi} W_i, i \in Q,$$

$$(20) \pi_i(u) = \frac{\pi_{0i}(u)}{1 + \xi} W_i, i \in Q.$$

Предположим, что требуется разработать механизм страхования, который побуждал бы страхователей выбирать тот же вектор действий, что и в отсутствие страхования (u^*) как равновесие Нэша. Тогда параметры страхового контракта должны, как минимум, удовлетворять следующим условиям:

$$(21) \xi_{0i}(u^*) \leq \xi_i p_i(u^*), i \in Q,$$

$$(22) \pi_{0i}(u^*) \leq (1 + \xi_i) p_i(u^*), i \in Q.$$

Подставляя выражения (19) и (20) в функции ожидаемых полезностей страхователей и дифференцируя по соответствующим действиям³⁴, получим:

$$(23) p'_{i_{u_i}}(u^*) + \xi'_{0i_{u_i}}(u^*) = (1 + \xi_i) \beta_{0i} / W_i, i \in Q,$$

$$(24) \pi'_{0i_{u_i}}(u^*) = (1 + \xi_i) \beta_{0i} / W_i, i \in Q.$$

³⁴ Для обеспечения точки максимума можно потребовать, чтобы страховой тариф или сумма нагрузки и вероятности наступления страхового случая были у каждого страхователя выпуклы по его действию.

Утверждение 3.7. Использование страховых тарифов или нагрузок, удовлетворяющих следующим условиям:

$$(25) \xi_{0i}(u) = \xi_i p_i(u), i \in Q,$$

$$(26) \pi_{0i}(u) = (1 + \xi_i) p_i(u), i \in Q.$$

исключает моральный риск³⁵.

Справедливость утверждения 3.7 обосновывается следующим образом: подставляя (25)-(26) в (23)-(24) и сравнивая с (17), получаем, что $u^* = u_*$.

Следующее утверждение является следствием общих результатов решения задач управления организационными системами, приведенных в [98].

Утверждение 3.8. а) При использовании механизма

$$(27) \xi_{0i}(u) = \begin{cases} \xi_i p_i(u_i^*, u_{-i}), u_i = u_i^* \\ \xi_0^{\max}, & u_i \neq u_i^* \end{cases}, i \in Q,$$

где $u^* = u_*$, а $\xi_0^{\max} = \max_{i \in Q} \max_u \xi_i p_i(u)$, выбор i -ым страхователем действия u_i^* является его доминантной стратегией;

б) При использовании механизма

$$(28) \xi_{0i}(u) = \begin{cases} \xi_i p_i(u_i^*, u_{-i}^*), u_i = u_i^* \\ \xi_0^{\max}, & u_i \neq u_i^* \end{cases}, i \in Q,$$

где $u^* = u_*$, а $\xi_0^{\max} = \max_{i \in Q} \max_u \xi_i p_i(u)$, вектор u^* является равновесием Нэша игры страхователей;

в) При использовании единой для всех страхователей нагрузки к нетто-ставке $\xi_0(u)$ или единого страхового тарифа $\pi_0(u)$ множество действий страхователей, реализуемых³⁶ страховщиком не шире, чем при использовании индивидуальных нагрузок или тарифов³⁷.

Проведем качественное обсуждение результатов утверждения 3.8. В соответствии с принципом декомпозиции игры управляемых субъектов [98], центр, используя механизм (27), предлагает каждому

³⁵ Использование управлений (25)-(26) при $u = u_*$ удовлетворяет (21)-(22).

³⁶ Напомним, что реализуемыми данной системой стимулирования называются действия, которые являются равновесными при этой системе стимулирования.

³⁷ Более того, при единых параметрах страховых контрактов исключение морального риска (см. утверждение 3.7) возможно не всегда. Чтобы убедиться в этом, достаточно в данных примера 3.6.4, выбрав, например, единую нагрузку равной линейной комбинации действий страхователей, получить противоречие с (21).

страхователю назначать значение соответствующей нагрузки исходя только из его собственных действий, независимо от действий других страхователей. Угроза использования в противном случае максимальной нагрузки ξ_0^{\max} (невыгодной ни одному из страхователей) делает страхование выгодным для каждого из них и, более того, делает выгодным выбор действия u_i^* (выполнение неравенства (21) при этом обеспечивает выгодность страхования по сравнению с равновесными по Нэшу ожидаемыми выигрышами в отсутствие страхования).

Используя механизм (28), центр предлагает каждому страхователю назначать значение соответствующей нагрузки исходя из его собственных действий, предполагая, что остальные страхователи также выбрали рекомендованные центром действия, что приводит к более слабому, чем пункт а), результату – соответствующий вектор действий является уже не равновесием в доминантных стратегиях, а равновесием Нэша.

Пункт в) является следствием доказанной в [98] теоремы о том, что унифицированное управление не более эффективно, чем персонализированное. Этот результат почти очевиден – так как единые параметры страхового контракта являются частным случаем различных комбинаций параметров, то и эффективность страхования (с точки зрения его мотивационной роли) при этом не выше (кроме того, возможно противоречие с условиями (21)).

Отметим, что для использования механизмов (27) и (28) необходимо, чтобы порядок функционирования был таков, что *индивидуальные действия страхователей становятся известными страховщику до момента внесения страховых взносов* (иначе параметры страхового контракта не могут зависеть от действий страхователей).

В заключение настоящего раздела, следуя общей идеологии исследования механизмов функционирования систем с агрегированием информации [98], рассмотрим модель страхования, в которой страховщик не наблюдает индивидуальные действия страхователей, а имеет лишь информацию об агрегированном результате их деятельности.

Пусть вероятности наступления страховых случаев p_i зависят от агрегированного результата деятельности страхователей $l = G(u)$, наблюдаемого страховщиком и являющегося известной страховщику *функцией агрегирования* $G(\cdot)$ их индивидуальных действий.

Страховщик, решая систему уравнений

$$(29) \frac{dp_i(l(u_*))}{dl} \frac{\partial G(u_*)}{\partial u_i} = \frac{\beta_{0i}}{W_i}, i \in Q,$$

может найти множество $E_N(l)$ равновесных по Нэшу векторов действий страхователей u_* и соответствующий агрегированный результат деятельности l_* . Следующий пример иллюстрирует, что равновесие Нэша в рассматриваемом классе задач существует не всегда.

Пример 3.6.5. Пусть $l = \sum_{i \in Q} u_i$, $p_i(l) = l^2 / 2 r_i$, $i \in Q$. Тогда в соответствии с (15) получаем: $\sum_{i \in Q} u_{i^*} = \beta_{0i} r_i / W_i$, $i \in Q$, то есть при раз-

личных (не полностью совпадающих) страхователях найти равновесие Нэша из системы уравнений (29) невозможно. В подобных ситуациях, быть может, имеет смысл рассчитывать на то, что страхователи выберут одно из эффективных по Парето действий. Однако, множество Парето в задачах экологического страхования, как правило, достаточно «велико»³⁸ [98, 110], что не позволяет центру однозначно определить реализуемый вектор действий страхователей. •

Утверждение 3.9. Если для любого результата деятельности страхователей существует единственный, приводящий к данному результату, вектор равновесных по Нэшу действий, то при использовании механизма

$$(30) \xi_{0i}(l) = \begin{cases} \xi_i p_i(u_i^*, u_{-i}^*), & l = l_*, \\ \xi_0^{\max}, & l \neq l_*, \end{cases} i \in Q,$$

где $u^* \in E_N(l_*)$ удовлетворяет (21), а $\xi_0^{\max} = \max_{i \in Q} \max_u \xi_i p_i(u)$, вектор u^* является равновесием Нэша игры страхователей.

Справедливость результата утверждения 3.9 следует из того, что, наблюдая только агрегированный результат деятельности, центр может (при условии, что данный результат является однозначным следствием выбора страхователями соответствующего равновесия Нэша) побудить страхователей стремиться достичь именно результа-

³⁸ Одна из возможных содержательных (экологических) интерпретаций такова: существует предельный уровень суммарного воздействия на окружающую среду со стороны нескольких страхователей. Если каждый из них заинтересован, например, в максимизации собственного объема производства, а воздействие на окружающую среду растет с ростом объема производства, то множество Парето составят все такие вектора объемов выпуска, что суммарное воздействие равно пороговому.

та деятельности z^* , обещая при его достижении назначить параметры страховых контрактов, оптимальные при действиях $u^* = E_N(l^*)$.

В заключение настоящего раздела приведем пример, иллюстрирующий возможности использования предложенного подхода к выбору параметров страхового контракта в условиях ненаблюдаемых действий страхователей.

Пример 3.6.6. Пусть $l = \sum_{i \in Q} (u_i)^2$, $p_i(l) = l^2 / 4 r_i$, $i \in Q$. Тогда в

соответствии с (29) получаем: $u_{i^*} l^* = \beta_{0i} r_i / W_i$, $i \in Q$. Возводя в квадрат и суммируя по всем страхователям, вычисляем:

$$l^* = \left(\sum_{i \in Q} \left(\frac{\beta_{0i} r_i}{W_i} \right)^2 \right)^{1/3}. \text{ Тогда имеет место:}$$

$$u_{i^*} = (\beta_{0i} r_i / W_i) / \left(\sum_{i \in I} \left(\frac{\beta_{0i} r_i}{W_i} \right)^2 \right)^{1/3}, i \in Q,$$

то есть равновесие Нэша существует и единственно. Следовательно, результат утверждения 3.9 применим для рассматриваемой модели. •

В заключение отметим, что при рассмотрении роли страхования в комплексе экономических механизмов обеспечения безопасности на первый план выступает возможность его комплексного взаимодополняющего использования совместно с механизмами снижения риска. И такая возможность существует – как следует из результатов утверждений 3.6-3.9, если некоторый уровень риска уже был достигнут в отсутствие страхования (например, за счет применения других экономических механизмов), то возможна разработка механизма страхования, который не изменял бы стратегии поведения страхователя (включая выбираемые им действия и отчисления на предупредительные мероприятия), но компенсировал бы ущерб в случае возникновения неблагоприятных ситуаций.

3.7. МЕХАНИЗМЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОТИВАЦИИ

Механизмы мотивации побуждают управляемых агентов (предприятия региона) предпринимать определенные действия в интересах управляющего органа – центра. В настоящем разделе описаны *механизмы экономической мотивации*, в которых центр управляет предприятиями путем установления тех или иных норма-

тивов – ставок налога с дохода, прибыли и т.д. [43]. Следует признать, что описываемая ниже модель несколько условна, так как, во-первых, в ней предполагается, что центр заинтересован, в первую очередь, в максимизации отчислений со стороны предприятий (которые могут быть направлены, например, на природоохранные мероприятия) и лишь во вторую очередь – в максимизации суммарного объема производства в регионе или суммы прибылей всех участников. Во-вторых, действующее российское законодательство не дает возможности органам государственного управления и надзорным органам регионального уровня произвольным образом изменять «систему налогообложения».

Пусть в регионе имеются n предприятий, и известны затраты $z_i(u_i)$ i -го предприятия, зависящие от его действия $u_i \geq 0$ (например, от объема выпускаемой агентом продукции), $i \in Q = \{1, 2, \dots, n\}$ – множеству предприятий. Будем считать функцию затрат непрерывной, возрастающей, выпуклой и равной нулю в нуле. Целевая функция i -го предприятия представляет собой разность между его доходом $H_i(u_i)$ и затратами $z_i(u_i)$: $f_i(u_i) = H_i(u_i) - z_i(u_i)$, $i \in Q$. Пусть функции затрат предприятий имеют вид: $z_i(u_i) = r_i \vartheta(u_i/r_i)$, $i \in Q$, где $\vartheta(\cdot)$ – возрастающая гладкая выпуклая функция, такая, что $\vartheta(0) = 0$. Обозначим $\varpi(\cdot) = \vartheta^{-1}(\cdot)$ – функцию, обратную производной функции $\vartheta(\cdot)$.

Рассмотрим четыре механизма экономической мотивации предприятий, а именно:

- 1) механизм отчислений («налог с дохода»);
- 2) централизованный механизм;
- 3) механизм с нормативом рентабельности;
- 4) механизм» налога на прибыль».

Механизм отчислений (налог с дохода). Пусть задана цена c единицы продукции, производимой предприятиями, и центр использует *норматив*³⁹ $\gamma \in [0; 1]$ отчислений от дохода предприятий. Тогда доход агента $H_i(u_i) = c u_i$ и целевая функция i -го предприятия с учетом отчислений центру имеет вид:

$$(1) f_i(u_i) = (1 - \gamma) c u_i - z_i(u_i), i \in Q.$$

Величина γ – норматив отчислений – может интерпретироваться как ставка налога на доход (выручку). Каждое предприятие выберет действие, максимизирующее его целевую функцию:

³⁹ Легко проверить, что в рамках введенных предположений оптимально использование единого норматива для всех агентов.

$$(2) u_i(\gamma) = r_i \varpi((1 - \gamma) c), i \in Q.$$

Целевая функция центра, равная сумме отчислений предприятий, будет иметь вид:

$$(3) \Phi(\gamma) = \gamma c H \varpi((1 - \gamma) c),$$

$$\text{где } H = \sum_{i \in Q} r_i.$$

Задача центра, стремящегося максимизировать свою целевую функцию, заключается в выборе норматива отчислений:

$$(4) \Phi(\gamma) \rightarrow \max_{\gamma \in [0;1]}$$

Если функции затрат предприятий являются функциями типа

Кобба-Дугласа, то есть $z_i(u_i) = \frac{1}{\alpha} (u_i)^\alpha (r_i)^{1-\alpha}$, $\alpha \geq 1$, $i \in Q$, то решение задачи (4) имеет вид:

$$(5) \gamma^*(\alpha) = 1 - 1/\alpha,$$

то есть оптимальное значение норматива отчислений $\gamma^*(\alpha)$ возрастает с ростом показателя степени α . Оптимальное значение целевой

функции центра при этом равно $\Phi_\gamma = \frac{\alpha - 1}{\alpha} c H \vartheta(\lambda / \alpha)$, то есть

$$\Phi_\gamma = (\alpha - 1) H \left(\frac{c}{\alpha}\right)^{\alpha/(\alpha-1)}, \text{ а сумма действий предприятий:}$$

$$U_\gamma = H \vartheta(\lambda / \alpha) = H (\lambda / \alpha)^{1/(\alpha-1)}.$$

Выигрыш i -го предприятия: $f_{i\gamma} = r_i (1 - 1/\alpha) (\lambda / \alpha)^{\alpha/(\alpha-1)}$, а сумма целевых функций всех участников системы (центра и всех предприятий) равна: $F_\gamma = (\alpha^2 - 1) H (\lambda / \alpha)^{\alpha/(\alpha-1)}/\alpha$.

Централизованный механизм. Сравним найденные показатели со значениями, соответствующими другой схеме экономической мотивации предприятий, а именно предположим, что центр использует централизованную схему – «забирает» себе весь доход от деятельности предприятий, а затем компенсирует им затраты от выбираемых ими действий u_i в случае выполнения плановых заданий (компенсаторная система стимулирования [98]).

В этом случае целевая функция центра равна:

$$(6) \Phi(u) = c \sum_{i \in Q} u_i - \sum_{i \in Q} z_i(u_i).$$

Решая задачу $\Phi(u) \rightarrow \max_{\{u_i \geq 0\}}$, центр находит оптимальные значения планов:

$$(7) u_i = r_i \varpi(c), i \in Q.$$

Оптимальное значение целевой функции центра при функциях затрат предприятий типа Кобба-Дугласа равно

$$\Phi_x = c^{\alpha/(\alpha-1)} H (1 - 1/\alpha),$$

а сумма действий предприятий равна $U_x = H \varpi(c) = H c^{1/(\alpha-1)}$.

Выигрыш i -го предприятия тождественно равен нулю, так как центр в точности компенсирует его затраты, а сумма целевых функций всех участников системы F_x (центра и всех предприятий) равна Φ_x .

Сравним полученные значения:

- $\Phi_x/\Phi_y = \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}} \geq 1$ и убывает с ростом α ;
- $U_x/U_y = \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}} \geq 1$ и убывает с ростом α ;
- $F_x/F_y = \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} / (\alpha + 1) \geq 1$ и убывает с ростом α .

Таким образом, если предприятия имеют функции затрат типа Кобба-Дугласа, то централизованный механизм экономической мотивации (с точки зрения ЭкЭС в целом) выгоднее, чем механизм отчислений, так как обеспечивает больший суммарный выпуск продукции, большее значение суммарной полезности всех элементов системы и большее значение отчислений на природоохранные мероприятия.

Фраза «с точки зрения ЭкЭС в целом» существенна, так как при использовании централизованного механизма прибыль (значение целевой функции) предприятий равна нулю – весь ресурс изымает «метасистема». Такая схема взаимодействия центра с предприятиями может не устраивать предприятия или быть нереализуема в рамках существующих институциональных ограничений, поэтому исследуем обобщение централизованной схемы, а именно *механизм с нормативом рентабельности*, при котором вознаграждение предприятия центром не только компенсирует его затраты в случае выполнения плана, но и оставляет в его распоряжении полезность, пропорциональную затратам. Коэффициент этой пропорциональности условно называется *нормативом рентабельности*. Рассмотренной выше централизованной схеме соответствует нулевое значение норматива рентабельности.

Механизм с нормативом рентабельности. В случае использования норматива рентабельности $\rho \geq 0$ целевая функция центра равна:

$$(8) \Phi_{\rho}(u) = c \sum_{i \in Q} u_i - (1 + \rho) \sum_{i \in Q} z_i(u_i).$$

Решая задачу $\Phi_{\rho}(u) \rightarrow \max_{\{u_i \geq 0\}}$, центр находит оптимальные значения планов:

$$(9) u_{i\rho} = r_i \max_{\{u_i \geq 0\}} \varpi(c/(1 + \rho)), i \in Q.$$

Оптимальное значение целевой функции центра при функциях затрат предприятий типа Кобба-Дугласа равно:

$$\Phi_{\rho} = c (c/(1 + \rho))^{1/(\alpha-1)} H(1 - 1/\alpha),$$

а сумма действий предприятий равна:

$$U_{\rho} = H \varpi(c/(1 + \rho)) = H (c/(1 + \rho))^{1/(\alpha-1)}.$$

Выигрыш i -го предприятия равен: $f_{i\rho} = \rho r_i (c/(1 + \rho))^{\alpha/(\alpha-1)}/\alpha$, а сумма целевых функций всех участников системы (центра и всех предприятий) равна: $F_{\rho} = cH(c/(1 + \rho))^{1/(\alpha-1)}(\alpha - 1/(1 + \rho))/\alpha$.

Сравним полученные значения (отметим, что при $\rho = 0$ все выражения для механизма с нормативом рентабельности переходят в соответствующие выражения для централизованного механизма):

- $\Phi_x/\Phi_{\rho} = (1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}} \geq 1$ и возрастает с ростом ρ ;
- $U_x/U_{\rho} = (1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}} \geq 1$ и возрастает с ростом ρ ;
- $F_x/F_{\rho} = \frac{(1 - \frac{1}{\alpha})(1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}}}{1 - \frac{1}{(1 + \rho)\alpha}} \geq 1$ и возрастает с ростом ρ .

Интересно, что максимум суммы целевых функций участников системы (центра и предприятий) достигается при нулевом нормативе рентабельности, то есть в условиях полной централизации!

Сравним теперь механизм с нормативом рентабельности с механизмом отчислений:

- $\Phi_{\gamma}/\Phi_{\rho} = \left(\frac{1 + \rho}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ и возрастает с ростом ρ ;
- $U_{\gamma}/U_{\rho} = \left(\frac{1 + \rho}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ и возрастает с ростом ρ ;
- $F_{\gamma}/F_{\rho} = \frac{(\alpha^2 - 1)}{\alpha^2 - \frac{\alpha}{(1 + \rho)}} \left(\frac{1 + \rho}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ и возрастает с ростом ρ .

Итак, приходим к выводу, что если предприятия имеют функции затрат типа Кобба-Дугласа, то механизм с нормативом рентабельности $\rho = \alpha - 1$ эквивалентен механизму отчислений.

Справедливость данного утверждения следует из того, что при $\rho = \alpha - 1$ все (!) показатели механизма с нормативом рентабельности совпадают с соответствующими показателями механизма отчислений, то есть выполняется $u_i(\gamma) = u_{i\rho}$, $i \in Q$, $\Phi_\gamma = \Phi_\rho$, $U_\gamma = U_\rho$, $f_{i\gamma} = f_{i\rho}$, $i \in Q$, $F_\gamma = F_\rho$.

Теперь рассмотрим четвертый механизм экономической мотивации – механизм налога на прибыль.

Механизм налога на прибыль. Если в качестве прибыли предприятия взять его целевую функцию – разность между доходом и затратами, то при ставке налога $\beta \in [0; 1]$ на эту прибыль целевая функция i -го предприятия примет вид:

$$(10) f_{i\beta}(u_i) = (1 - \beta) [c u_i - z_i(u_i)], i \in Q,$$

а целевая функция центра:

$$(11) \Phi_\beta(u) = \beta [c \sum_{i \in Q} u_i - \sum_{i \in Q} z_i(u_i)].$$

Действия, выбираемые предприятиями при использовании налога на прибыль, совпадают с действиями, выбираемыми ими при централизованной схеме, следовательно:

$$(12) u_{i\beta} = r_i \varpi(c), i \in Q.$$

Оптимальное значение целевой функции центра при функциях затрат предприятий типа Кобба-Дугласа равно⁴⁰:

$$\Phi_\beta = \beta c^{\alpha/(\alpha-1)} H(1 - 1/\alpha),$$

а сумма действий предприятий: $U_\beta = H \varpi(c) = H c^{1/(\alpha-1)}$. Выигрыш i -го предприятия равен: $f_{i\beta} = (1 - \beta) c^{\alpha/(\alpha-1)} r_i (1 - 1/\alpha)$, а сумма целевых функций всех участников системы (центра и всех предприятий): $F_\beta = c^{\alpha/(\alpha-1)} H(1 - 1/\alpha)$.

Сравним полученные значения:

- $\Phi_x / \Phi_\beta = 1 / \beta \geq 1$ и возрастает с ростом β ;
- $U_x / U_\beta = 1$;
- $F_x / F_\beta = 1$.

Таким образом, механизм налога на прибыль приводит к той же сумме полезностей и к тому же значению суммы равновесных

⁴⁰ Очевидно, что оптимальное с точки зрения центра значение ставки налога на прибыль β равно единице. При этом механизм налога на прибыль превращается в централизованный механизм.

действий предприятий, что и централизованный механизм, но в первом случае полезность центра в β раз ниже, чем во втором. Поэтому механизм налога на прибыль может интерпретироваться как механизм компромисса [98], в котором *точка компромисса* определяется ставкой налога на прибыль, задающей пропорцию, в которой делится прибыль системы в целом между центром и предприятиями.

Сравним теперь механизм налога на прибыль с механизмом с нормативом рентабельности:

- $\Phi_\beta / \Phi_\rho = \beta (1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}}$;
- $U_\beta / U_\rho = (1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}} \geq 1$;
- $F_\beta / F_\rho = \frac{(1 - \frac{1}{\alpha})(1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}}}{1 - \frac{1}{(1 + \rho)\alpha}} \geq 1$.

И, наконец, сравним механизм налога на прибыль с механизмом отчислений (механизмом налога с дохода):

- $\Phi_\beta / \Phi_\gamma = \beta \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}}$;
- $U_\beta / U_\gamma = \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}}$;
- $F_\beta / F_\gamma = \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} / (\alpha + 1)$.

Проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод: если предприятия имеют функции затрат типа Кобба-Дугласа, то механизм налога на прибыль:

- при $\beta = 1 / \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}}$ с точки зрения центра эквивалентен оптимальному механизму отчислений;
- при $\beta = 1 - 1 / \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}$ с точки зрения предприятий эквивалентен оптимальному механизму отчислений;
- при $\beta = 1 / (1 + \rho)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ с точки зрения центра эквивалентен механизму с нормативом рентабельности;

– при $\beta = 1 - \rho / (\alpha - 1) (1 + \rho)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}$ с точки зрения предприятий эквивалентен механизму с нормативом рентабельности.

Сравнительный анализ. Таким образом, рассмотрены четыре механизма экономической мотивации. С точки зрения суммы полезностей всех участников системы и суммы действий предприятий максимальной эффективностью обладают централизованный механизм и механизм налога на прибыль (с любой ставкой). Использование механизма отчислений или механизма с нормативом рентабельности приводит к меньшей эффективности.

При использовании механизма отчислений, механизма с нормативом рентабельности или механизма налога на прибыль в зависимости от параметров (соответственно – норматива отчислений, норматива рентабельности и ставки налога на прибыль) полезности центра и предприятий перераспределяются по-разному по сравнению с централизованным механизмом (см. приведенные выше оценки).

Использование полученных результатов позволяет в каждом конкретном случае получать оценки параметров, при которых различные механизмы эквивалентны. Так, например, при квадратичных функциях затрат ($\alpha = 2$) оптимально следующее значение норматива отчислений (ставки налога с дохода): $\gamma^* = 0,5$. При $\rho^* = 1$ механизм с нормативом рентабельности полностью эквивалентен механизму отчислений, а при $\beta^* = 0,5$ механизм налога на прибыль эквивалентен им обоим с точки зрения центра, а при $\beta^* = 0,75$ – с точки зрения предприятий (см. Табл. 13).

Табл. 13. Параметры механизмов экономической мотивации при квадратичных затратах предприятий

Механизм	Параметры			
	Φ	U	F	$\sum f_i$
Налог с дохода	$c^2H/4$	$cH/2$	$3c^2H/8$	$c^2H/8$
Централизованный	$c^2H/2$	cH	$c^2H/2$	0
Норматив рентабельности	$c^2H / (2(1+\rho))$	$cH / (1+\rho)$	$c^2H(1+2\rho) / (2(1+\rho)^2)$	$\lambda^2H\rho / (2(1+\rho)^2)$
Налог на прибыль	$\beta c^2H/2$	cH	$c^2H/2$	$(1-\beta) c^2H/2$

3.8. МЕХАНИЗМЫ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Специфической чертой ЭкЭС является подчиненность одного и того же агента (например, предприятия) одновременно нескольким центрам одного уровня иерархии, функции которых могут быть различными (координирующая, обеспечивающая, контролирующая и т.д.). Необходимость согласования интересов органов управления неизбежно приходится учитывать при разработке региональных программ. Типовым примером [46, 109] являются органы территориального управления и органы отраслевого управления.

В таких структурах, называемых *матричными структурами управления* (МСУ), центры, осуществляющие управление предприятием, оказываются вовлеченными в «игру», равновесие в которой имеет достаточно сложный вид. В частности, как показывают результаты анализа МСУ [40, 51, 57, 98, 99], можно выделить два устойчивых режима взаимодействия центров – режим сотрудничества и режим конкуренции.

В *режиме сотрудничества* центры действуют совместно, что позволяет добиваться требуемых результатов деятельности управляемого предприятия с использованием минимального количества ресурсов.

В *режиме конкуренции*, который возникает, если цели центров различаются достаточно сильно, ресурсы расходуются неэффективно.

Пусть ЭкЭС состоит из одного предприятия и k центров. Стратегией предприятия является выбор объема производства $u \geq 0$ и уровня безопасности $y \geq 0$, что требует от него затрат $z(u)$ и $\varphi(y)$ соответственно. Каждый центр получает от деятельности предприятия «доход», описываемый функцией $H_i(u, y)$, и выплачивает предприятию стимулирование $\sigma_i(u, y)$, $i \in K = \{1, 2, \dots, k\}$ – множеству центров. Таким образом, целевая функция i -го центра имеет вид

$$(1) \Phi_i(\sigma_i(\cdot), u, y) = H_i(u, y) - \sigma_i(u, y), i \in K,$$

а целевая функция предприятия:

$$(2) f(\{\sigma_i(\cdot)\}, u, y) = c u + \sum_{i \in K} \sigma_i(u, y) - z(u) - \varphi(y).$$

Порядок функционирования следующий: центры одновременно и независимо выбирают функции стимулирования и сообщают их предприятию, которое затем выбирает свое действие. Ограничимся рассмотрением множества Парето-эффективных равновесий Нэша

игры центров, в которых, как показано в [57, 99], их стратегии имеют вид

$$(3) \sigma_i(u', u, x, y) = \begin{cases} V_i, & y = x, u = u' \\ 0, & y \neq x \text{ или } u \neq u' \end{cases}, i \in K.$$

Содержательно, центры договариваются о том, что будут побуждать предприятие выбирать объем производства u' и достигать уровня безопасности x и осуществлять совместное стимулирование. Такой режим взаимодействия центров называется *режимом сотрудничества*.

Обозначим $u^* = \arg \max_{u \geq 0} [c u - z(u)]$. Если $\varphi(\cdot)$ – неубывающая функция, то из условий оптимальности по Парето следует, что сумма вознаграждений, получаемых предприятием от центров в случае выполнения их рекомендаций, равна

$$(4) \sum_{i \in K} V_i = c(u^* - u') - [z(u^*) - z(u')] + \varphi(x).$$

Условие выгоды сотрудничества для каждого из центров можно сформулировать следующим образом: в режиме сотрудничества каждый центр должен получить полезность не меньшую, чем он мог бы получить, осуществляя стимулирование предприятия в одиночку. Полезность i -го центра от «самостоятельного» взаимодействия с предприятием равна

$$(5) \Phi_i^* = \max_{u, y \geq 0} [H_i(u, y) - c(u^* - u) + [z(u^*) - z(u)] - \varphi(y)], i \in K.$$

Обозначим $V = (V_1, V_2, \dots, V_k)$,

$$(6) S = \{u \geq 0, y \geq 0 \mid \exists V \in \mathfrak{R}_+^k: H_i(u, y) - V_i \geq \Phi_i^*, i \in K,$$

$$\sum_{i \in K} V_i = c(u^* - u) - [z(u^*) - z(u)] + \varphi(y)\}$$

– множество таких действий предприятия, для реализации которых сотрудничество выгодно для центров.

Совокупность (u, y) и соответствующих векторов V называется *областью компромисса*:

$$(7) \Lambda = \{u \geq 0, y \geq 0, V \in \mathfrak{R}_+^k \mid H_i(u, y) - V_i \geq \Phi_i^*, i \in K,$$

$$\sum_{i \in K} V_i = c(u^* - u) - [z(u^*) - z(u)] + \varphi(y)\}.$$

Режим сотрудничества по определению имеет место, если область компромисса не пуста: $\Lambda \neq \emptyset$.

Обозначим

$$(8) \Phi_0^* = \max_{u, y \geq 0} \left[\sum_{i \in K} H_i(u, y) - c(u^* - u) + [z(u^*) - z(u)] - \varphi(y) \right].$$

По аналогии с тем, как это делается в [99], можно доказать следующее утверждение.

Утверждение 3.10. Область компромисса не пуста тогда и только тогда, когда:

$$(9) \Phi_0^* \geq \sum_{i \in K} \Phi_i^*.$$

Таким образом, критерием реализуемости режима сотрудничества является условие (9). Содержательно оно означает, что, действуя совместно, центры могут получить бóльшую суммарную полезность, чем действуя в одиночку. Разность $\Phi_0^* - \sum_{i \in K} \Phi_i^*$ может

интерпретироваться как мера согласованности интересов центров и характеристика *эмерджентности* ЭкЭС.

Если условие (9) не выполнено и $\Lambda = \emptyset$, то имеет место *режим конкуренции* центров, характеризуемый так называемым аукционным решением. Упорядочим (перенумеруем) центров в порядке убывания величин $\{\Phi_i^*\}$: $\Phi_1^* \geq \Phi_2^* \geq \dots \geq \Phi_k^*$. Победителем будет первый центр, который предложит предприятию, помимо компенсации отклонения от выигрыша $c u^* - z(u^*)$, полезность, на сколь угодно малую величину превышающую Φ_2^* .

Обсудим качественно полученные результаты. Одним из недостатков МСУ является то, что при недостаточном разделении полномочий между центрами возможен конфликт между ними, когда они стремятся «перетянуть» на себя находящихся под их общим контролем агентов. При этом ЭкЭС теряет в эффективности функционирования, так как на такое «борьбу» агентов могут уходить весьма существенные средства.

Сотрудничество центров – совместное назначение планов и использование согласованной системы стимулирования агентов (3) – позволяют избежать подобного конфликта и неэффективности. Переход от режима конкуренции к режиму сотрудничества требует согласования интересов центров, что может осуществляться управляющими органами более высоких уровней иерархии в рамках так называемых *ромбовидных структур* [46, 99, 109, 135] – см. Рис. 42.

Приведем пример, иллюстрирующий результат утверждения 3.10. Пусть $k=2$, $\varphi(y) = y$, $z(u) = u^2 / 2$, $c = 1$, $H_1(u, y) = u$,

$H_2(u, y) = 2y - y^2/2 r_y$, то есть имеются два управляющих органа – отраслевой (заинтересован только в росте объема производства) и территориальный (заинтересован только в значении УБ, равном r_y).

Предприятие, имеющее целевую функцию $u - u^2/2 - y$, в отсутствие управления не будет обращать внимание на безопасность, то есть выберет $(u^*, v^*) = (1; 0)$, получив при этом выигрыш, равный $1/2$.

Первый управляющий орган заинтересован в выборе предприятием объема производства и УБ, равных 2 и 0 соответственно. Взаимодействуя с предприятием в-одиночку, он может получить выигрыш $\Phi_1^* = 3/2$.

Второй управляющий орган заинтересован в выборе предприятием объема производства и УБ, равных 0 и r_y соответственно. Взаимодействуя с предприятием в-одиночку, он может получить выигрыш $\Phi_2^* = r_y/2$.

Максимум правой части выражения (8) достигается при объеме производства и УБ, равных соответственно (2; r_y). При этом $\Phi_0^* = 3/2 + r_y/2$, то есть (9) выполняется как равенство. Следовательно, область компромисса не пуста и сотрудничество между органами управления возможно.

Записав систему неравенств (7):

$$\begin{cases} V_1 \leq 1/2, \\ V_2 \leq r_y/2, \\ V_1 + V_2 \geq (1 + r_y)/2, \end{cases}$$

получаем, что область компромисса состоит из единственной точки: $u' = 2, x = r_y, V_1 = 1/2, V_2 = r_y/2$. Характеристика эмерджентности такой ЭжЭС равна нулю.

Специфический вид области компромисса в рассматриваемом примере обусловлен тем, что интересы управляющих органов лежат «в разных плоскостях» – отраслевой орган управления не интересуется значением уровня безопасности, а территориальный орган – значением объема производства. Для того чтобы уйти от этой вырожденной и вряд ли соответствующей практике ситуации, предположим, что территориальный орган управления заинтересован и в производстве, то есть примем, что его функция дохода равна $H_2(u, y) = 2uy - y^2/2 r_y$. Такой переход может быть осуществлен, например, вмешательством органа управления (ОУ) более высокого уровня иерархии в рамках соответствующей ромбовидной структуры – см. Рис. 42.

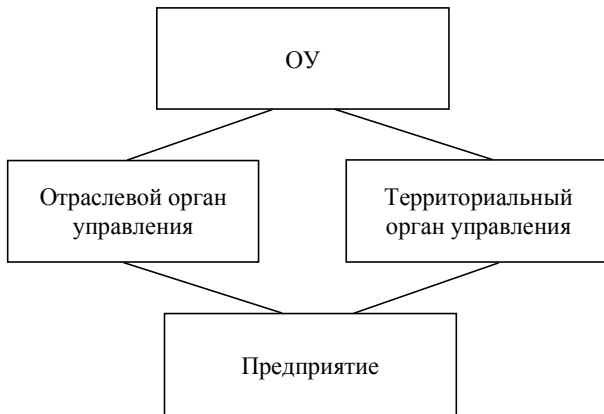


Рис. 42. Ромбовидная структура

Тогда второй управляющий орган заинтересован в выборе предприятием объема производства и УБ, равных $\frac{1-2r_y}{1-4r_y}$ и $\frac{r_y}{1-4r_y}$ соответственно. Взаимодействуя с предприятием в одиночку, он может получить выигрыш $\Phi_2^* = \frac{r_y(1-10r_y)}{(1-4r_y)^2}$. Выберем $r_y = 0,1$. Тогда $\Phi_2^* = 0$.

Максимум правой части выражения (8) достигается при объеме производства и УБ, равных 3 и 0,5 соответственно. При этом $\Phi_0^* = 9/4$, то есть (9) выполняется как строгое неравенство. Следовательно, область компромисса не пуста и сотрудничество между органами управления возможно.

Записав систему неравенств (7):

$$\begin{cases} V_1 \leq 3/2, \\ V_2 \leq 7/4, \\ V_1 + V_2 \geq 5/2, \end{cases}$$

получаем, что при $u' = 3$, $x = 0,5$, область компромисса состоит из множества точек, заштрихованного на Рис. 43. Характеристика эмерджентности такой ЭкЭС равна

$$\Phi_0^* - (\Phi_1^* + \Phi_2^*) = 3/4 > 0.$$

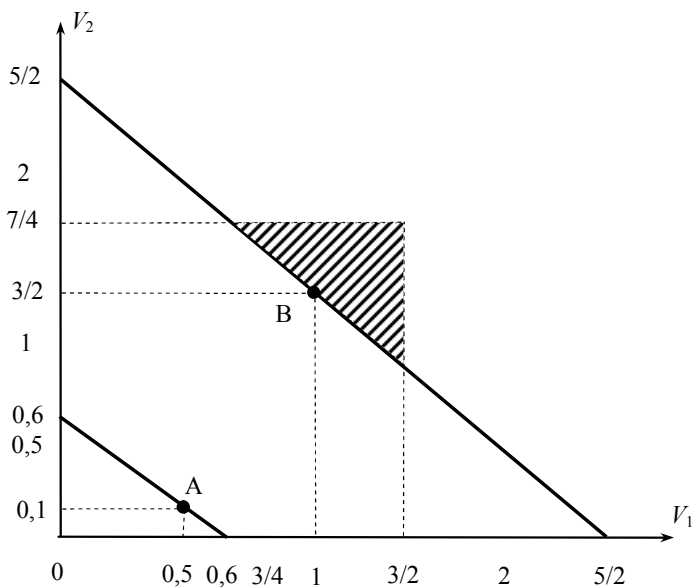


Рис. 43. Область компромисса

Таким образом, использование механизма согласования интересов управляющих органов в ЭкЭС позволяет обеспечить баланс их интересов и интересов предприятий, и, кроме того, в случае грамотного воздействия на интересы – повысить эффективность функционирования системы в целом. Действительно, в рассмотренном примере добавление заинтересованности второго управляющего органа в росте объема производства позволяет перейти из точки А (см. Рис. 43), например, в точку В, которая строго доминирует первую по всем критериям (объем производства растет, уровень безопасности увеличивается, выигрыши управляющих органов растут) – см. Табл. 14, кроме равенства выигрышей предприятия.

Табл. 14. Сравнение двух механизмов согласования интересов

«Точка равновесия» (см. Рис. 43)	u	y	Φ_1	Φ_2	f
А	2	0,1	3/2	0,05	1/2
В	3	0,5	2	0,25	1/2

ГЛАВА 4. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Если вторая и третья главы настоящей работы посвящены «теоретическому» исследованию механизмов управления эколого-экономическими системами, то в настоящей главе приводятся результаты «экспериментов» – деловых и имитационных игр. В разделе 4.1 проводится качественное обсуждение игрового моделирования как метода исследования механизмов управления безопасностью. Разделы 4.2-4.6 содержат описание подготовки и результатов проведения деловых игр, соответственно, для механизмов платы за риск, стимулирования снижения риска, финансирования снижения уровня риска, компенсации затрат на снижение уровня риска, продажи квот на уровень риска.

4.1. ИГРОВОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Экспериментальный метод исследований в таких науках как физика, химия, биология широко известен. К настоящему времени в них уже накоплен огромный опыт по организации *экспериментов*. В распоряжении экспериментаторов имеются тщательно разработанные и прошедшие проверку на практике принципы планирования эксперимента и методы обработки его результатов. В области управления сложными социально-экономическими, эколого-экономическими, организационными системами, к которым и относятся вопросы разработки экономических механизмов обеспечения безопасности, подобного опыта применения экспериментов не существует, хотя проведение различных учений и тренировок персонала для приобретения навыков работы в новых условиях практикуется уже довольно давно.

В первую очередь, сюда можно отнести всевозможные военные учения и маневры [180]. Для их проведения создавались соответствующие ситуации, которые в той или иной степени отражали возможную боевую обстановку. В этих искусственно созданных ситуациях участники учений и маневров осваивали приемы боя, приобретали опыт ведения боевых действий.

Аналогичным путем шло развитие *аварийных игр* [87, 108], в которых участники отрабатывали свои действия в случае возникновения нештатных ситуаций на промышленных предприятиях.

Следующим шагом в развитии игрового моделирования в военной области стала организация и проведение *штабных учений*. При организации штабных учений или штабных игр широко применялись модели, разработанные с помощью карт и планов, которые являются удобным средством моделирования. Таким образом, военные игры, с одной стороны, предназначены для обучения военнослужащих оперативному реагированию на внезапно возникающие и быстро меняющиеся ситуации, а с другой стороны, для приобретения навыков разработки и реализации крупномасштабных операций.

Расширение области применения военных игр, в конечном счете, привело к тому, что военная проблематика стала захватывать и чисто экономические вопросы. Так, в 1955 году сотрудниками американской фирмы «Rand Corporation» была разработана первая игра с применением ЭВМ. Цель игры заключалась в ознакомлении и обучении офицеров службы материально-технического обеспечения американского военно-воздушного флота вопросам управления снабжением запасными частями военно-воздушных баз США.

В 1956 г. представители American Management Association (АМА) изучили опыт военных игр и разработали имитационную игру, моделирующую процесс принятия решений высшим руководством фирмы [178].

Бурное развитие вычислительной техники и, особенно, средств моделирования, привело к тому, что применение игровых математических моделей для решения стратегических, экономических, финансовых и других задач получило широкое распространение.

Эффективным средством проверки свойств организационных и экономических механизмов, в том числе – механизмов обеспечения безопасности [113], является метод деловых имитационных игр [20, 21, 54, 156].

Применение игрового имитационного моделирования при разработке механизмов обеспечения безопасности позволяет осуществлять экспериментальную проверку теоретических результатов и практических предложений по созданию новых и совершенствованию существующих механизмов. Кроме того, игровой подход позволяет практическим работникам получить определенное представление о новых экономических механизмах и приобрести некоторый опыт их применения. Следовательно, игровое имитационное моде-

лирование можно рассматривать и как метод экспериментального исследования, и как инструмент обучения.

При проведении *имитационной игры* исследуется функционирование моделируемой системы в течение определенного периода времени. В игровой интерпретации отдельный период функционирования системы рассматривается как одна партия, при этом предполагается, что механизм функционирования определен и не меняется при переходе от одного периода к другому.

При проведении имитационных игр, функции активных элементов, связанные с принятием решений, выполняют игроки. Каждая партия имитационной игры, как и большинство игр, связанных с анализом организационных и экономических механизмов, проводится в три этапа.

1. Этап сбора данных;
2. Этап планирования;
3. Этап реализации.

На этапе сбора данных ведущему игры сообщается запрашиваемая информация, на этапе планирования на основе полученной информации формируется управленческое решение и, наконец, на этапе реализации определяются значения целевых функций игроков (их выигрыши).

Отметим важное направление, связанное с применением имитационных игр, как в исследовательских целях, так и в целях обучения. Это *игры с участием автоматов* (artificial players or robots). В таких играх часть участников игры заменяются *автоматами* (под автоматом понимается специальная программа, в которой реализован алгоритм поведения лица, принимающего решения) с формализованными процедурами принятия решений. Можно утверждать, что замена реального игрока на искусственного представляет собой попытку построить модель поведения человека. Эта модель включает в себя основные параметры, характеризующие индивидов, и, прежде всего, мотивы экономической активности, ее цели и средства достижения этих целей.

Естественно, что имитация многообразия человеческой личности, ее неповторимой индивидуальности, разнообразных мотивов ее деятельности – задача в полном объеме практически неразрешима. Однако в данном случае проблема значительно упрощается, так как формализуется главным образом то, что объясняет экономическое поведение людей в различных хозяйственных ситуациях.

Как отмечается в [3, 50, 59, 100], среди многочисленных подходов к моделированию экономического поведения человека условно можно выделить несколько основных направлений. В первом направлении экономическое поведение людей в рамках модели «человека экономического» или «*homo economicus*» предполагает использование постулата о *рациональном поведении человека*. В его основе лежит стремление индивидуума получить максимальный результат при минимальных затратах в условиях ограниченности используемых возможностей и ресурсов. Модели человека в рамках второго направления включают в себя стремление не только к материальным благам, но и определенные элементы психологического характера – милосердие, цели, связанные с традициями, соображениями престижа, использованием свободного времени и т.д. Для третьего направления характерно изменение мотивации деятельности в направлении возрастания значения тех или иных составляющих, которые обеспечивают реализацию не столько материальных, сколько духовных потребностей личности.

Анализ перечисленных направлений моделирования экономического поведения человека позволяет сделать вывод, что стремление человека минимизировать свои затраты и максимизировать выгоду явно просматривается во всех подходах к моделированию человеческой деятельности. Отсюда можно выдвинуть гипотезу, что принцип рационального экономического поведения является универсальным экономическим принципом при моделировании «человека экономического». И именно этот принцип обычно закладывается в основу формальных моделей процедур принятия решений в алгоритмах поведения автоматов.

Необходимость проведения игр с автоматами проявляется в тех случаях, когда необходимо провести исследование функционирования системы с большим числом элементов (проведение соответствующей игры с большим числом участников нереально) или когда необходимо провести значительное число партий для исследования динамики игры или для получения статистически значимой оценки результатов. Это связано с тем, что «быстродействие» реальной имитационной игры принципиально ограничено временем принятия решения человеком (порядка одной минуты в простейших играх). Игры автоматов позволяют значительно сократить продолжительность одной партии.

Автоматы, используемые в игровых моделях для анализа функционирования сложных систем, программируются на основании

некоторых гипотез о поведении людей в моделируемой ситуации. Сами гипотезы формируются на основе анализа стратегий реальных игроков в имитационной игре и эти гипотезы можно, в свою очередь, проверить при проведении имитационной игры.

Алгоритм выбора решений автоматом, который используется во многих имитационных играх, в том числе – в описываемых ниже, основывается на *гипотезе индикаторного поведения* [72, 106].

Если считать, что в каждой партии выбор u_i i -м игроком определяет его движение в сторону его цели, то процедура, реализующая гипотезу индикаторного поведения, может быть представлена в виде

$$(1) \quad \begin{aligned} u_i^{k+1} &= u_i^k + \gamma_i^k (\tilde{u}_i^k - u_i^k), \\ \gamma_i^k &\in [0; 1], \end{aligned}$$

где u_i^{k+1} – состояние i -го автомата в $k+1$ -й партии игры, \tilde{u}_i^k – положение цели i -го автомата в k -й партии, $i \in Q = \{1, 2, \dots, n\}$ – множеству игроков, $k = 1, 2, \dots$. Другими словами, это то состояние, которое обеспечивает i -му автомату максимальное или минимальное (в зависимости от задачи) значение его целевой функции в k -й партии игры. Значение γ_i^k определяет величину шага в сторону цели. Конкретное значение γ_i^k может зависеть от времени, текущего состояния и некоторых других факторов, внешних по отношению к модели. В играх, где используются автоматы с индикаторным поведением, настройка автоматов заключается в выборе процедуры изменения γ_i^k от партии к партии.

Основная сложность при реализации алгоритма индикаторного поведения заключается в определении положения цели \tilde{u}_i^k . Это связано с тем, что в общем случае при проведении игры отдельный участник не имеет точной информации о поведении оппонентов. Однако, во многих случаях каждый игрок, опираясь на собственную информацию, сообщенную центру, на знание закона управления и на полученный выигрыш, может восстановить агрегированную информацию о стратегиях других игроков [93].

Ниже в настоящей главе приводится описание игровых экспериментов и результаты, полученные при проведении имитационных игр для ряда механизмов управления ЭкЭС.

4.2. ИМИТАЦИОННАЯ ИГРА «МЕХАНИЗМЫ ПЛАТЫ ЗА РИСК»

В данной игре предполагается, что затраты i -го игрока (предприятия) по достижению уровня безопасности y_i равны

$$(1) \varphi_i = \frac{y_i^2}{2r_i}.$$

Если i -му предприятию установлен уровень безопасности y_i , то затраты этого предприятия на достижение уровня безопасности y_i и плата за риск, равный $1 - y_i$, равны

$$(2) z_i(y_i) = \lambda(1 - y_i) + \frac{y_i^2}{2r_i}.$$

Естественно предположить, что каждое предприятие стремится сократить эти затраты. Поэтому, примем, что целевой функцией игроков является функция (2).

На этапе сбора данных каждый игрок сообщает ведущему игры (центру) информацию, необходимую для формирования уровня безопасности (УБ). Считается, что центру известен только отрезок возможных значений параметра $r_i \in [d_i, D_i]$, $i \in Q$. Поэтому игроки, зная процедуру формирования плановых уровней безопасности y_i и норматива λ , сообщают центру оценки s_i параметра r_i , позволяющие им, по их мнению, уменьшить значение своей целевой функции.

На этапе планирования ведущий, исходя из значения X интегрального (регионального) УБ определяет значения плановых уровней безопасности y_i и норматива λ :

$$(3) \lambda = \frac{X}{\sum_{i=1}^n s_i}.$$

$$y_i = \lambda s_i, i \in Q.$$

И, наконец, на этапе реализации игроки подсчитывают значения своих целевых функций.

На этом партия игры завершается, и игроки переходят к следующей партии, то есть опять сообщают ведущему необходимую информацию, ведущий в соответствии с (3) формирует плановые уровни безопасности и значения норматива λ , и игроки подсчитывают значения своих целевых функций и т.д.

Игра заканчивается, когда стратегии игроков сходятся в некоторые равновесные ситуации. По стратегиям игроков в равновесной ситуации можно судить об эффективности исследуемого экономического механизма. Победителем считается тот игрок, у которого суммарное значение целевой функции за все партии игры оказалось наименьшим.

В приведенных ниже результатах игрового эксперимента участвовали четыре игрока-автомата ($n = 4$). Региональный уровень безопасности в игре был равен 3 ($X = 3$). Значения параметров r были: $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 2,5$, $r_4 = 2,5$. Оценка s параметра r , сообщаемая игроками ведущему игры (центру), находилась в пределах $s \in [0,4; 4]$. Автоматы формировали свою информацию для центра в соответствии с гипотезой индикаторного поведения (см. выражение (4.1.1)).

Значения коэффициентов γ_i^k (в процедуре (4.1.1)) были одинаковыми для всех периодов: $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$, $\gamma_4 = 0,4$, а положение цели i -го автомата в k -й партии определялось выражением

$$(4) \tilde{s}_i^k = \frac{\sigma_i^k r_i (1 + X)}{r_i X + \sigma_i^k X - r_i},$$

где $\sigma_i^k = \sum_{j=1}^n s_j^k - s_i^k$. Стратегии игроков представлены на Рис. 44.

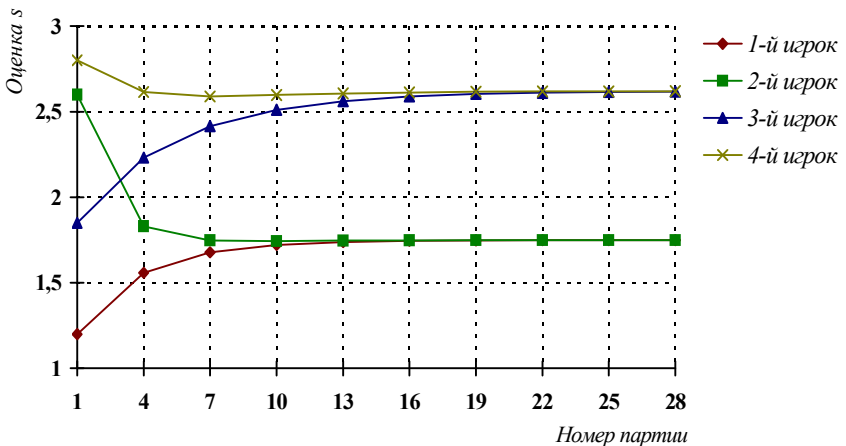


Рис. 44

Из Рис. 44 следует, что примерно за девятнадцать партий стратегии автоматов сошлись в равновесную ситуацию, и $s_1^* = s_2^* = 1,75$, а $s_3^* = s_4^* = 2,62$, в то время как теоретический расчет значений оценок s_i , $i = 1, 2, 3, 4$, в ситуации равновесия при выполнении гипотезы слабого влияния показывал совпадение оценок s_i^* с истинными значениями r_i . Таким образом, расхождение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i составило для первых двух автоматов 14,3 %, и 4,6 % для других двух автоматов. На Рис. 45 приведен график изменения норматива λ .

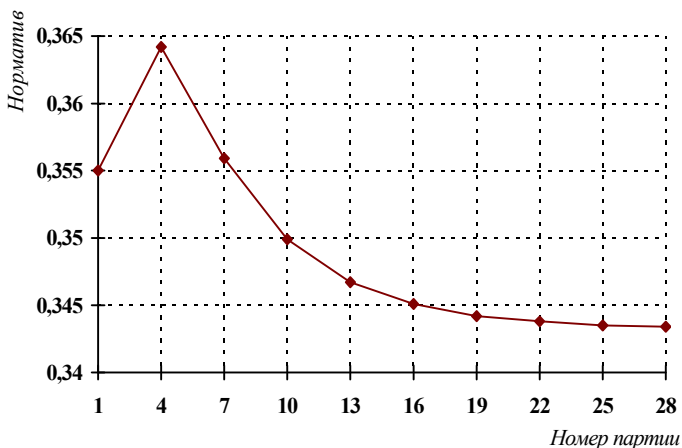


Рис. 45

Из Рис. 45 следует, что в ситуации равновесия норматив λ принимает минимальное значение, равное 0,343, в то время как теоретически рассчитанное значение норматива равно 0,375.

На Рис. 46 приведены графики изменения затрат игроков на достижение заданного уровня безопасности и плату за риск. А на Рис. 47 изображен график изменения суммарных затрат на достижение в регионе уровня безопасности $X = 3$.

Из Рис. 46 – Рис. 47 следует, что в ситуации равновесия суммарные затраты на достижение заданного уровня безопасности и плата за риск всех игроков и каждого игрока в отдельности принимают минимальные значения.

Степень влияния числа участников игрового эксперимента на его результаты, или, другими словами, эффект гипотезы слабого

влияния, может быть оценен результатами другого игрового эксперимента, в котором принимали участие восемь игроков ($n = 8$).

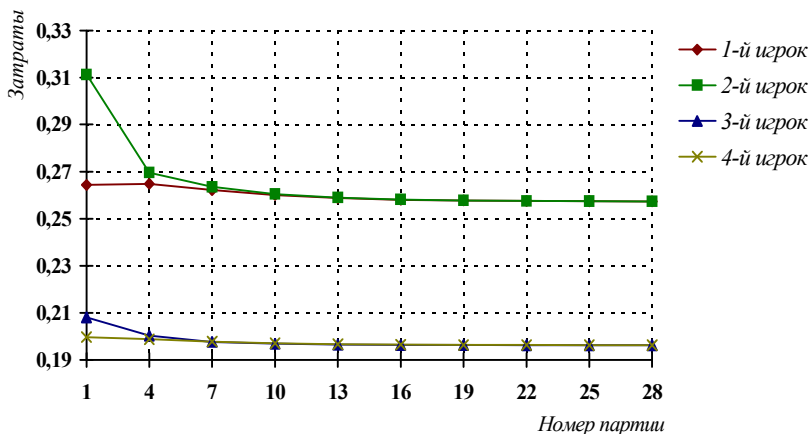


Рис. 46

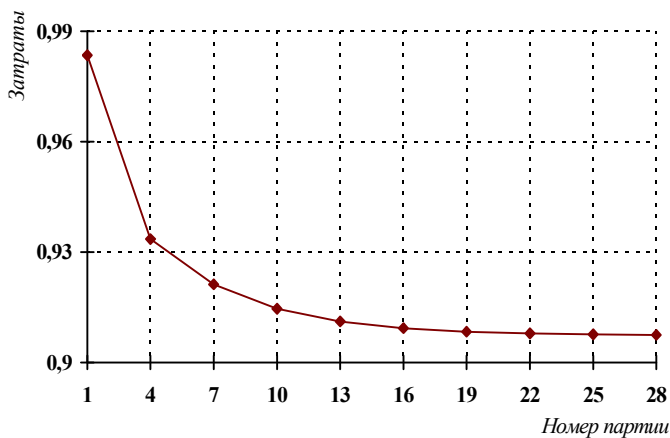


Рис. 47

Региональный УБ в этой игре был равен 6 ($X = 6$). Нетрудно заметить, что УБ $X = 3$ для четырех предприятий региона в некотором смысле аналогичен УБ $X = 6$ для восьми предприятий региона. Действительно, для случая четырех предприятий региона максимальный

УБ равен 4, и УБ $X=3$ соответствует 75 % от максимально возможного УБ. Соответственно, при максимальном УБ, равном 8, уровень безопасности $X=6$ соответствует тем же самым 75 % от максимально возможного уровня безопасности.

Значения параметров r в новом эксперименте были: $r_1=1,5$, $r_2=1,5$, $r_3=2,5$, $r_4=2,5$, $r_5=1,5$, $r_6=1,5$, $r_7=2,5$, $r_8=2,5$, а значения коэффициентов γ_i^k : $\gamma_1=0,3$, $\gamma_2=0,5$, $\gamma_3=0,2$, $\gamma_4=0,4$, $\gamma_5=0,3$, $\gamma_6=0,5$, $\gamma_7=0,2$, $\gamma_8=0,4$.

Стратегии восьми автоматов представлены на Рис. 48.

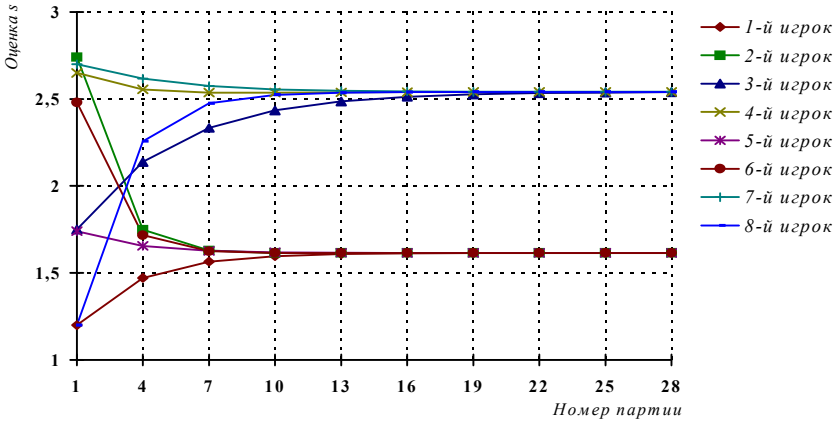


Рис. 48

Из Рис. 48 следует, что стратегии автоматов сошлись в равновесную ситуацию и $s_1^* = s_2^* = s_5^* = s_6^* = 1,62$, а $s_3^* = s_4^* = s_7^* = s_8^* = 2,54$. В этом случае расхождение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i составило для первого, второго, пятого и шестого автомата 8 %, и 1,6 % – для остальных автоматов.

Для случая $r_1=r_2=\dots=r_n=r$ несложно получить значения равновесных оценок s_i^* . Действительно, подставив (3) в (2) и дифференцируя выражение по s_i , получаем

$$\frac{\partial z_i}{\partial s_i} = \frac{\partial \lambda}{\partial s_i} (1 - y_i) - \lambda \frac{\partial y_i}{\partial s_i} + \frac{y_i}{r_i} \frac{\partial y_i}{\partial s_i} = 0,$$

или

$$(5) - \left(\sum_{j=1}^n s_j - s_i X \right) - \left(\sum_{j=1}^n s_j - s_i \right) X + \frac{s_i}{r_i} \left(\sum_{j=1}^n s_j - s_i \right) X = 0.$$

Так как $r_1=r_2=\dots=r_n=r$, то можно предположить, что $s_1^*=s_2^*=\dots=s_n^*=s^*$, тогда (5) можно записать в виде

$$rX + s(n-1)X - r = (n-1)r + (n-1)rX,$$

а отсюда следует

$$(6) \quad s^* = \frac{(n-2)X + n}{(n-1)X} r.$$

Отклонение равновесного значения s^* от истинного значения r составляет $\delta = \frac{|s^* - r|}{r} 100\% = \frac{|n-X|}{(n-1)X} 100\%$. Таким образом, для $n=4$

и $X=3$, $\delta = 11,11\%$, и, соответственно, для $n=8$ и $X=6$, $\delta = 4,76\%$.

Из (6) следует, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s^* = \frac{X+1}{X} r.$$

Равновесная оценка s^* с ростом n будет стремиться к истинному значению параметра r , если X будет возрастать с ростом n (например, $X = X_0 n$).

Результаты теоретического исследования модели линейного механизма платы за риск, полученные ранее и приведенные выше результаты игровых экспериментов, соответствуют таким исходным данным, когда в ситуации равновесия $\{s_i^*\}$, $i \in Q$, выполняется условие

$$(7) \quad y_i^* = \frac{s_i^*}{\sum_{j=1}^n s_j^*} X \leq M_i,$$

где $M_i \leq 1$ – максимальный уровень безопасности, который может быть запланирован для i -го объекта. В данном случае считается, что по определению, уровень безопасности i -го объекта y_i не может быть больше 1. В частности, выполнение условия слабого влияния, обеспечивает сообщение достоверной информации лишь в случае справедливости условия

$$y_i^* = \frac{r_i}{\sum_{j=1}^n r_j} X \leq M_i.$$

При проведении игровых экспериментов, если в какой-либо из партий игры для k -го игрока возникала такая ситуация, что

$$y_k = \frac{s_k}{\sum_{j=1}^n s_j} X > M_k,$$

то полагали y_k равным M_k , и планируемый уровень безопасности распределялся между остальными игроками в соответствии со следующей процедурой

$$(8) y_i = \frac{X - M_k}{\sum_{j \neq k} s_j} s_i, \quad i = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n.$$

В случае, когда условие (7) не выполняется для k -го игрока, предполагается, что для него выполняется *гипотеза благожелательного отношения* к центру. То есть, если изменение оценки s_k не приводит к изменению значения целевой функции k -го игрока, то он будет сообщать центру достоверную информацию. Для всех остальных игроков планируемый уровень безопасности будет определяться в соответствии с процедурой (8). Предполагая, что число участников игрового эксперимента достаточно велико, и что справедлива гипотеза слабого влияния, легко придти к заключению, что в ситуации равновесия все игроки сообщают достоверную информацию.

Однако при проведении игровых экспериментов с автоматами не всегда удаётся получить точное значение равновесной стратегии. Это вызвано тем, что невозможно точно определить положение цели i -го автомата в k -й партии.

Действительно, зная процедуру формирования планового уровня безопасности (3) и свой собственный плановый уровень безопасности y_i , i -й игрок может восстановить агрегат оценок σ_i остальных

участников игры. Так как $y_i = \frac{s_i}{s_i + \sigma_i} X$, то $\sigma_i = \frac{X - y_i}{y_i} s_i$. Этот

агрегат используется для определения положения цели в соответствии с процедурой (4). Однако при использовании процедуры (8) получить точное значение σ_i невозможно.

На Рис. 49 приведены результаты игрового эксперимента для четырех игроков ($n = 4$). Региональный уровень безопасности в игре был равен 3 ($X = 3$), ограничения для каждого игрока $M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = 1$. Значения параметров r были: $r_1 = 1,3$, $r_2 = 1,3$, $r_3 = 1,3$, $r_4 = 2,6$, а значения коэффициентов γ_i^k : $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$,

$\gamma_4=0,4$. Оценка s параметра r , сообщаемая игроками ведущему игры (центру), находилась в пределах $s \in [0,4; 4]$.

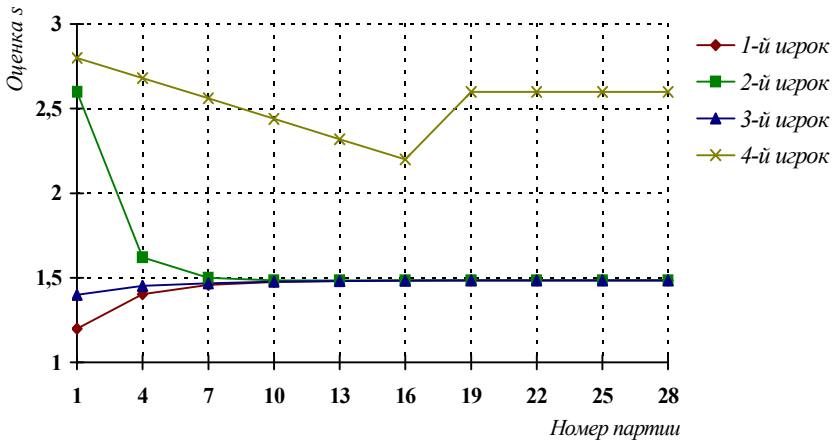


Рис. 49

Из Рис. 49 следует, что автоматы сошлись в некоторую равновесную ситуацию $s_1^* = s_2^* = s_3^* = 1,49$, $s_4^* = 2,6$. Однако, эта равновесная ситуация не является равновесием по Нэшу. Для рассматриваемого примера равновесной ситуацией по Нэшу является $s_1^* = s_2^* = s_3^* = 1,38$, $s_4^* = 2,6$. Таким образом, расхождение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i составило для первых трех игроков 6,4 %, в то время как четвертый игрок сообщал истину. Величина планового уровня безопасности для каждого игрока при этом была равна $y_1^* = y_2^* = y_3^* = 2/3$, $y_4^* = 1$. Отметим, что, если все игроки сообщают центру достоверную информацию, то должно иметь место $y_1 = y_2 = y_3 = 0,6$, $y_4 = 1,2$. Однако, по условию $y_4 \leq 1$, и в результате получается $y_1 = y_2 = y_3 = 2/3$, $y_4 = 1$. Однако следует заметить, что условие $y_i \leq 1$ – это чисто теоретическое условие, так как оно допускает значение уровня безопасности для отдельного предприятия равным 1. Хотя на реально работающем предприятии такой уровень безопасности вряд ли достижим. Поэтому в дальнейшем, при анализе модели линейного механизма платы за риск, будем полагать, что максимальное значение планируемого уровня безопасности для отдельного предприятия не может превышать величины $M_i < 1$.

При ограничении на максимальный плановый уровень безопасности, те игроки, для которых не выполняется условие (7), в ситуации равновесия будут заинтересованы сообщать максимально возможную оценку. Этот вывод следует из того факта, что с ростом оценки для этих игроков планируемый уровень безопасности уже не увеличивается, а норматив λ будет падать, что приведет к снижению платы за риск, и, как следствие, к уменьшению общих затрат игрока.

Результат проведения игрового эксперимента для тех же условий, что и в предыдущем случае, но при ограничении на максимальное значение планируемого уровня безопасности $M_i=0,8$ представлен на Рис. 50.

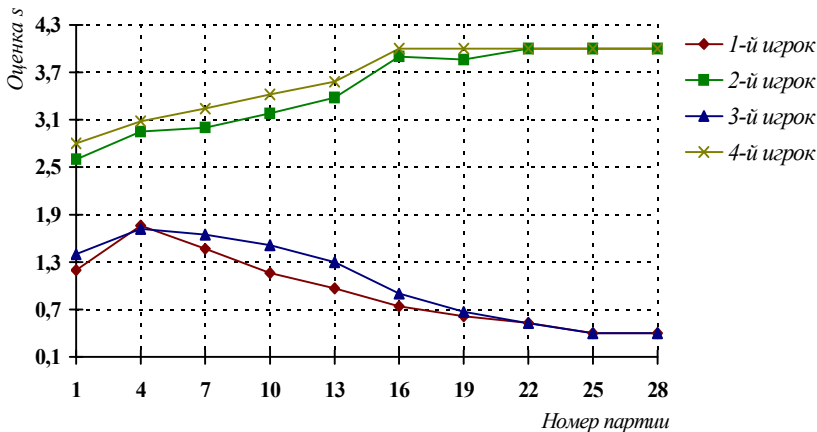


Рис. 50

Подчеркнем тот факт, что, несмотря на одинаковые возможности первого, второго и третьего игроков, в ситуации равновесия один из этих игроков сообщает максимально возможную оценку, а два других, сообщают минимально возможную оценку. Изменение значений целевых функций игроков для этого случая представлено на Рис. 51.

В ситуации равновесия значения целевых функций игроков равны $z_1 = z_3 = 0,291$, $z_2 = 0,314$ и $z_4 = 0,191$. Если бы первые три игрока сообщили оценки $s_1 = s_2 = s_3 = 0,4$, а $s_4 = 4$, то значения целевых функций игроков были бы соответственно равны $z_1 = z_2 = z_3 = 0,361$, а $z_4 = 0,239$.

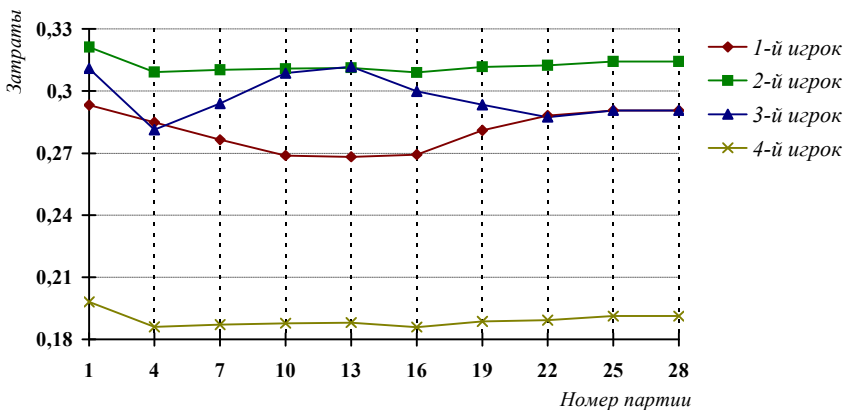


Рис. 51

То есть, один из игроков, имеющий такие же условия и возможности, что и остальные игроки, в ситуации равновесия проигрывает им. Сходимость в такую ситуацию равновесия во многом определяется выбором стратегии в первой партии игры.

4.3. ИМИТАЦИОННАЯ ИГРА «МЕХАНИЗМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА»

В настоящем разделе предполагается, что затраты i -го предприятия на достижение уровня безопасности y_i определяются выражением (1) предыдущего раздела.

Каждое предприятие стимулируется за обеспечение заданного УБ. Величина стимулирования равна λy_i . Целевая функция игрока равна разности стимулов и затрат, то есть

$$(1) f_i = \lambda y_i - \frac{y_i^2}{2r_i}.$$

Норматив λ и УБ y_i определяются в соответствии с выражением (3) предыдущего раздела.

Ниже приведены результаты игрового эксперимента, в котором также участвовали четыре игрока ($n = 4$), а исходные данные в точности соответствовали данным в рассмотренном выше эксперименте.

То есть $X = 3$, $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 2,5$, $r_4 = 2,5$, $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$, $\gamma_4 = 0,4$, $M = 1$ и $s_i \in [0,4; 4]$.

В процессе игры участники стремятся максимизировать свою целевую функцию. Стратегии игроков для этого варианта игры представлены на графике, изображенном на Рис. 52.

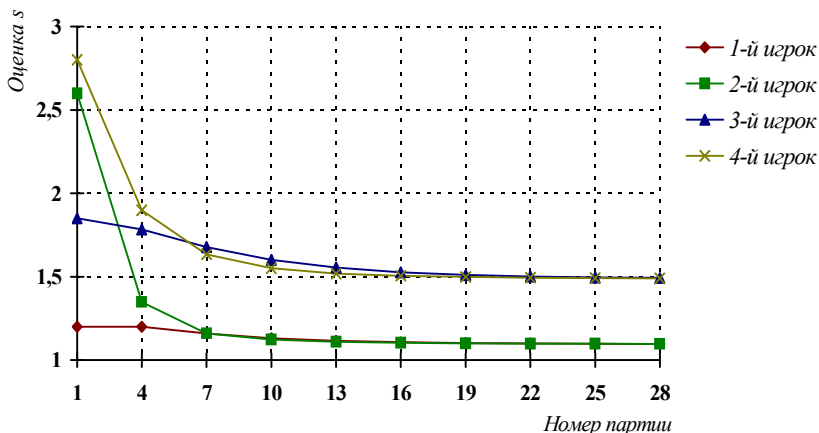


Рис. 52

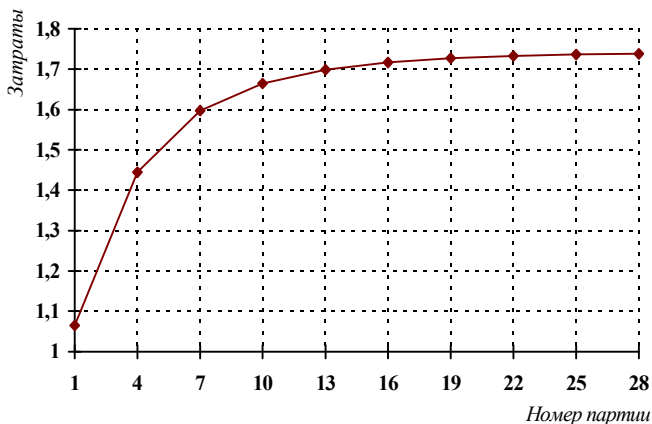


Рис. 53

Из Рис. 52 следует, что стратегии игроков сошлись в равновесную ситуацию и $s_1^* = s_2^* = 1,1$, а $s_3^* = s_4^* = 1,49$. Таким образом, расхо-

ждение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i составило для первых двух игроков 26,7 % и 40,4 % для других двух игроков.

График изменения суммарных затрат на стимулирование участников игры приведен на Рис. 53.

Степень влияния числа участников игрового эксперимента на его результаты также может быть оценена результатами игрового эксперимента с восемью игроками. Здесь, как и в предыдущем случае, $X = 6$, $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 2,5$, $r_4 = 2,5$, $r_5 = 1,5$, $r_6 = 1,5$, $r_7 = 2,5$, $r_8 = 2,5$, $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$, $\gamma_4 = 0,4$, $\gamma_5 = 0,3$, $\gamma_6 = 0,5$, $\gamma_7 = 0,2$, $\gamma_8 = 0,4$. Изменение стратегий игроков представлено на графике, изображенном на Рис. 54.

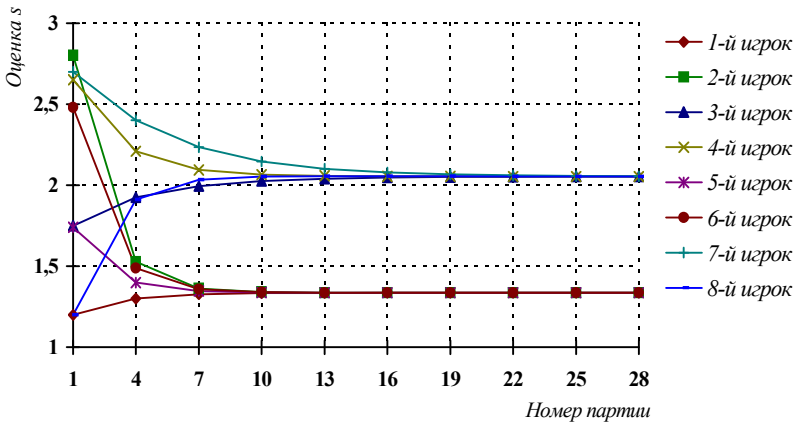


Рис. 54

Из этого графика видно, что стратегии игроков сошлись в равновесную ситуацию и $s_1^* = s_2^* = s_5^* = s_6^* = 1,34$, а $s_3^* = s_4^* = s_7^* = s_8^* = 2,05$. В этом случае, расхождение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i составило для первого, второго, пятого и шестого игроков 10,7 % и 18 % – для остальных игроков. Суммарные затраты на стимулирование участников игры в ситуации равновесия составили 2,65. При действии линейного механизма стимулирования для случая $r_1 = r_2 = \dots = r_n = r$ получим значения равновесных оценок s_i^* . Для этого, подставив (4.2.3), продифференцируем (1) по s_i :

$$\frac{\partial f_i}{\partial s_i} = \frac{\partial \lambda}{\partial s_i} y_i + \lambda \frac{\partial y_i}{\partial s_i} - \frac{y_i}{r_i} \frac{\partial y_i}{\partial s_i} = 0, \text{ или}$$

$$r_i \left(\sum_{j=1}^n s_j - 2s_i \right) - s_i \left(\sum_{j=1}^n s_j - s_i \right) = 0.$$

Полагая, что $s_1^* = s_2^* = \dots = s_n^* = s^*$, последнее выражение можно записать в виде $r(n-2) = s^*(n-1)$, или $s^* = \frac{n-2}{n-1}r$. Отклонение равновесного значения s^* от истинного значения r составляет $\delta = \frac{1}{n-1}100\%$. Таким образом, для $n=4$, $\delta = 33,33\%$, и, соответственно, для $n=8$, $\delta = 14,29\%$.

Результаты теоретического исследования модели линейного механизма стимулирования и приведенные выше результаты игровых экспериментов соответствуют таким исходным данным, когда в ситуации равновесия $\{s_i^*\}$, $i \in Q$, выполняется условие (7) предыдущего раздела.

Рассмотрим теперь результаты игрового эксперимента, когда максимальное значение планируемого уровня безопасности для отдельного предприятия ограничено величиной $M_i = 0,8$. Пусть, как и в примере, рассмотренном при анализе линейного механизма платы за риск, $n=4$, $X=3$, $r_1=1,5$, $r_2=1,5$, $r_3=2,5$, $r_4=2,5$, $\gamma_1=0,3$, $\gamma_2=0,5$, $\gamma_3=0,2$, $\gamma_4=0,4$, $s \in [0,4; 4]$. При этих данных условие (7) предыдущего раздела не выполняется.

График изменения стратегий игроками, представлен на Рис. 55.

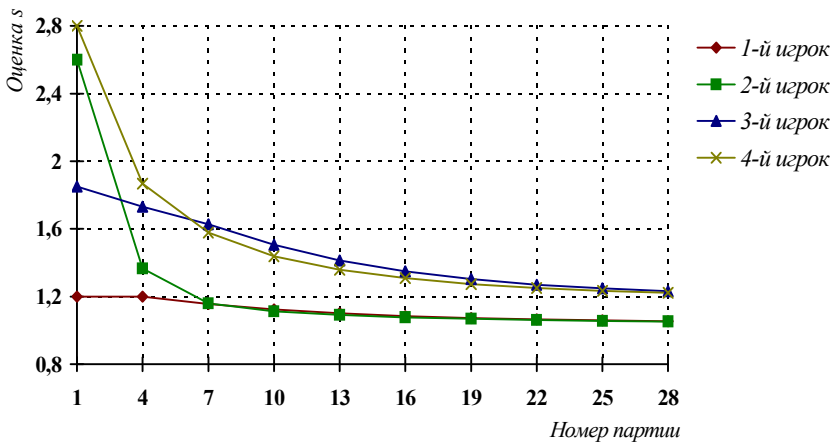


Рис. 55

Из него видно, что по сравнению с вышерассмотренным примером, когда $M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = 1$, игроки в ситуации равновесия сообщают меньшие оценки коэффициента r . Так $s_1^* = s_2^* = 1,05$, а $s_3^* = s_4^* = 1,23$. То есть, расхождение равновесных значений s_i^* и истинных значений r_i увеличилось и составило для первых двух игроков 30 % и 50,8 % для других двух игроков.

На Рис. 56 представлен график изменения суммарных затрат на стимулирование участников игры.

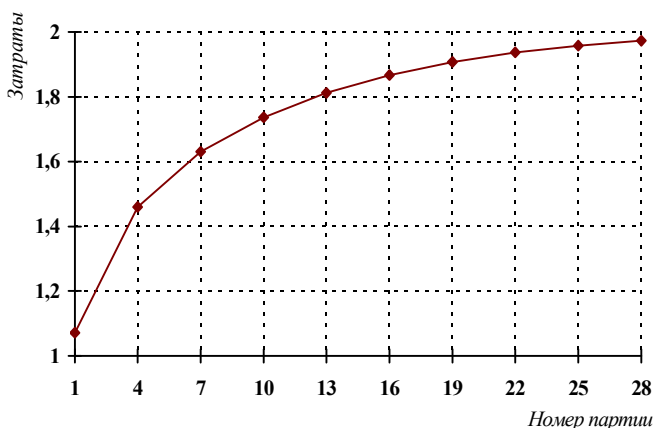


Рис. 56

Из сравнения графиков на Рис. 53 и Рис. 56 следует, что при одном и том же уровне безопасности региона суммарные затраты на стимулирование (при ограничении на значение планового уровня безопасности для отдельного предприятия) в 1,14 раза выше, чем при отсутствии ограничений. Таким образом, введение дополнительных ограничений на максимальное значение планового уровня безопасности отдельного предприятия при неизменном уровне безопасности всего региона приводит к большему искажению информации, и, как следствие, к большим суммарным затратам на стимулирование.

4.4. ИМИТАЦИОННАЯ ИГРА «МЕХАНИЗМЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА»

Задача финансирования мероприятий по поддержанию необходимого уровня безопасности состоит в распределении общего объема

средств между исполнителями на проведение работ по снижению уровня риска. Фактически, эта задача является задачей распределения ресурсов – одной из наиболее распространенных задач в теории и практике управления экономическими системами. Ее решение существенным образом зависит от принципов, заложенных в процедуры распределения финансовых средств.

В имитационных играх по распределению централизованных средств рассматривается функционирование двухуровневой системы, состоящей из центра (лица, принимающего решение о распределении финансовых средств для обеспечения заданного уровня безопасности), и элементов системы – предприятий. В распоряжении центра имеется некоторый объем средств R_0 , который распределяется между предприятиями.

Следует отметить, что поддержание допустимого уровня безопасности элементом системы возможно, если он получает объем средств не меньше, чем некоторая величина. Если средств будет получено меньше этой величины, они будут израсходованы, но качество выполненной работы не будет удовлетворять даже самым минимальным требованиям, предъявляемым центром, а эффект, полученный центром от средств, направленных на обеспечение заданного уровня безопасности, будет фактически нулевым. В дальнейшем, не умаляя общности, будем считать, что каждое предприятие всегда получает такой объем средств, который позволяет выполнить работу, отвечающую минимальным требованиям центра. В то же время, очевидно, что получение предприятием большого объема финансирования обеспечивает поддержание допустимого уровня безопасности в соответствии с заданными требованиями, однако эффективность использования выделенных средств, при этом уменьшается.

Центр стремится так распределить имеющиеся в его распоряжении финансовые средства, чтобы суммарный эффект, полученный от выполнения всех мероприятий обеспечения безопасности, был бы наибольшим. Величина этого эффекта зависит от того, сколько финансовых средств будет выделено каждому предприятию, насколько эффективно они будут использованы. В то же время, перед предприятиями стоит задача получить финансовые средства в таком объеме, который обеспечил бы им наиболее благоприятные условия функционирования и, как следствие – максимизировал их целевые функции.

К введенным выше обозначениям добавим следующие:

R_0 – количество финансовых средств, имеющихся у центра;
 V_i – количество финансовых средств, получаемое i -м предприятием от центра;

\hat{r}_i – коэффициент, характеризующий использование финансовых средств i -м предприятием;

Если i -е предприятие получает финансовые средства в количестве V_i , то эффект их использования будет оцениваться некоторой функцией эффекта $h_i(\hat{r}_i, V_i)$, другими словами, будем считать, что $y_i = h_i(\hat{r}_i, x_i)$. Положим, что $h_i(\hat{r}_i, V_i) = \sqrt{\hat{r}_i V_i}$.

Так как задача центра заключается в увеличении суммарного эффекта по всем предприятиям, то в случае, когда центру точно известны значения \hat{r}_i , $i \in Q$, задача распределения финансовых средств имеет вид:

$$(1) \quad \sum_{j=1}^n \sqrt{\hat{r}_j V_j} \xrightarrow{V} \max$$

$$\sum_{j=1}^n V_j = R_0.$$

И, соответственно, решение этой задачи:

$$(2) \quad V_i = \frac{\hat{r}_i}{\sum_{j=1}^n \hat{r}_j} R_0.$$

Целевую функцию i -го предприятия можно представить в виде

$$(3) \quad f_i = V_i - \frac{y_i^2}{2r_i},$$

или, для $y_i = \sqrt{\hat{r}_i V_i}$: $f_i = V_i - \frac{\hat{r}_i V_i}{2r_i} = V_i \left(1 - \frac{\hat{r}_i}{2r_i} \right)$.

Как показано выше, центр распределил бы имеющийся у него ресурс оптимально, если бы имел точную информацию о значениях коэффициентов \hat{r}_i . Обычной схемой распределения финансовых средств в условиях неполной информированности центра является финансирование на основе информации, полученной от предприятий. То есть, сначала предприятия сообщают в центр заявки на финансирование – оценки s_i значений коэффициентов \hat{r}_i , а центр на

основе полученных оценок распределяет финансовые средства R_0 , решая задачу (1).

В этом случае объем финансирования, который получает предприятие, равен

$$(4) V_i = \frac{s_i}{\sum_{j=1}^n s_j} R_0.$$

Таким образом, средства между предприятиями распределяются пропорционально значениям s_i . Если принять, что в центре имеется информация о максимально возможных значениях D_i коэффициентов \hat{r}_i , то можно показать, что при пропорциональном распределении финансовых средств для каждого предприятия имеется абсолютно оптимальная стратегия формирования заявки, а именно $s_i = D_i$, $i \in Q$. Действительно, на множестве допустимых заявок $0 \leq s_i \leq D_i$ количество финансовых средств $V_i(s)$, выделяемое i -му предприятию, есть строго монотонная возрастающая функция s_i . В частности, при максимальных заявках i -му предприятию выделяется количество

средств, равное $\frac{D_i}{\sum_{j=1}^n D_j} R_0$. Большую заявку предприятие сообщить

не может в связи с ограничением на максимальное значение коэффициентов \hat{r}_i , а при уменьшении заявки у него уменьшается количество выделяемых финансовых средств. Т.к. целевая функция $f(\hat{r}_i, V_i)$ каждого предприятия строго монотонно возрастает при увеличении V_i , поэтому $f(\hat{r}_i, V_i(s))$ строго монотонно возрастает при увеличении s_i на интервале $[0; D_i]$. Отсюда следует, что $s_i = D_i$ – единственная абсолютно оптимальная стратегия каждого предприятия. А ситуация $s_i = D_i$, $i \in Q$ является равновесной стратегией (равновесием в доминантных стратегиях [50] игры предприятий).

При проведении игрового эксперимента с автоматами положение цели \tilde{s}_i^k для них формировалось из условия

$$y_i^{k+1} = \sqrt{\tilde{s}_i^k V_i^{k+1}} = M_i. \text{ Откуда } \tilde{s}_i^k = \frac{M_i + \sqrt{M_i^2 + 4RM_i\sigma_i}}{2R_0}.$$

На Рис. 57 приведены результаты игрового эксперимента, в котором участвовали четыре игрока-автомата ($n = 4$), а исходные данные такие же, как в рассмотренных выше экспериментах. То есть, $X = 3$, $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 2,5$, $r_4 = 2,5$, $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$, $\gamma_4 = 0,4$, $M = 1$ и $s_i \in [0,4; 4]$. Кроме того, $R_0 = 1$, $\hat{r}_1 = 2$, $\hat{r}_2 = 1,9$, $\hat{r}_3 = 1,7$, $\hat{r}_4 = 1,4$.

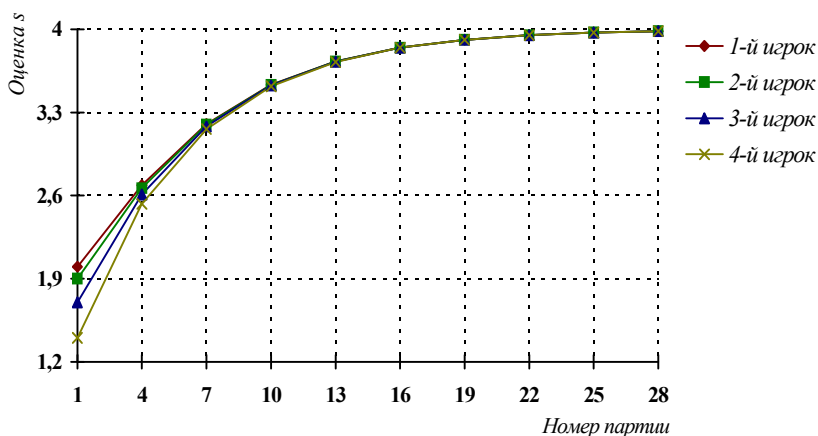


Рис. 57

Задача участников игры заключается в максимизации разности полученной компенсации и фактически потраченных средств на достижение требуемого уровня безопасности. Стратегии игроков для этого варианта игры представлены на графике, изображенном на Рис. 57. Соответственно, изменение общего уровня безопасности в системе из четырех предприятий представлено на Рис. 58.

Пропорциональное распределение при нехватке распределяемых средств всегда ведет к росту заявок. Из (3) следует, что целевая функция игроков возрастает с ростом получаемого ресурса, поэтому распределяемых средств для них будет не хватать. Это и показал график на Рис. 57. Более того, целевая функция (3) монотонно возрастает при увеличении V для любого $t \leq 1/2$, если $y_i = (\hat{r}_i V_i)^t$, то есть тенденция завышения оценок в этом случае будет сохраняться.

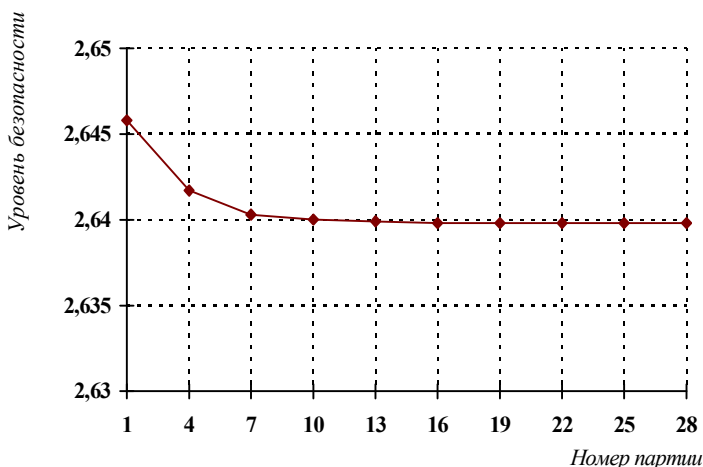


Рис. 58

Принцип обратных приоритетов. В этом случае предприятия делают сразу заявку на необходимые им финансовые ресурсы, поэтому в дальнейшем под s_i будем понимать заявку на финансовые средства. Идея принципа обратных приоритетов [20] заключается в следующем: приоритет предприятия при распределении финансовых средств тем выше, чем меньший объем средств оно запрашивает. Другими словами, приоритет предприятия обратно пропорционален его заявке на объем финансирования. Качественно этот принцип распределения можно обосновать на примере двух одинаковых предприятий. Если предприятия планируют дать одинаковый эффект и при этом запрашивают разное количество финансовых средств, то в этом случае предприятие, запрашивающее меньший объем финансирования, планирует использовать получаемые средства с большей отдачей, поэтому в качестве показателя приоритета предприятия может выступать величина эффекта $\varepsilon_i(\hat{r}_i, s_i) / s_i$. Процедура распределения на основе принципа обратных приоритетов может быть представлена в виде

$$(5) V_i(s) = \begin{cases} s_i, & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j \leq R_0, \\ \min \left(s_i, \frac{\vartheta_i(\hat{r}_i, s_i)/s_i}{\sum_{j=1}^n \vartheta_j(\hat{r}_j, s_j)/s_j} R \right), & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j > R_0. \end{cases}$$

При такой процедуре возможны случаи, когда часть финансовых средств R_0 останется нераспределенной при $\sum_{j=1}^n s_j > R_0$. Пусть

$R_{\text{ост}} = R_0 - \sum_{j=1}^n V_j$. Один из способов распределения остатка финан-

совых средств, который применяется в игре, – это распределение пропорционально неудовлетворенному спросу. Обозначим $\Delta s_i = s_i - V_i(s)$, тогда дополнительное количество финансовых средств, которое получает предприятие, определяется выражением

$$\Delta V_i = \frac{\Delta s_i}{\sum_{j=1}^n \Delta s_j} R_{\text{ост}}. \text{ Легко показать, что при этом } V_i + \Delta V_i \leq s_i.$$

В ситуации равновесия должно выполняться условие

$$s_i^* = \frac{\vartheta_i(\hat{r}_i, s_i^*)/s_i^*}{\sum_{j=1}^n \vartheta_j(\hat{r}_j, s_j^*)/s_j^*} R_0.$$

Для того чтобы найти равновесные значения s_i^* , необходимо

решить систему уравнений:
$$s_i^* = \frac{\sqrt{\hat{r}_i/s_i^*}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\hat{r}_j/s_j^*}} R_0.$$

Решение этой системы дает единственную ситуацию равнове-

сия:
$$s_i^* = \frac{\sqrt[3]{\hat{r}_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt[3]{\hat{r}_j}} R_0.$$
 При этом $V_i(s_i^*) = s_i^*$.

При игровой оценке эффективности процедуры распределения финансовых средств, основанной на принципе обратных приорите-

тов, также можно использовать автоматы. В каждой партии игрового эксперимента положение цели \tilde{s}_i^k для автоматов находится из решения уравнения

$$\tilde{s}_i^k = \frac{\sqrt{\hat{r}_i / \tilde{s}_i^k}}{\sum_{j \neq i}^n \sqrt{\hat{r}_j / s_j^k} + \sqrt{\hat{r}_i / \tilde{s}_i^k}} R_0.$$

На Рис. 59 приведены графики изменения стратегий участников игрового эксперимента, в котором участвовали четыре игрока, а исходные данные такие же, как в рассмотренных ранее экспериментах, только ограничения на заявки финансовых средств лежат в пределах $[0; 1]$.

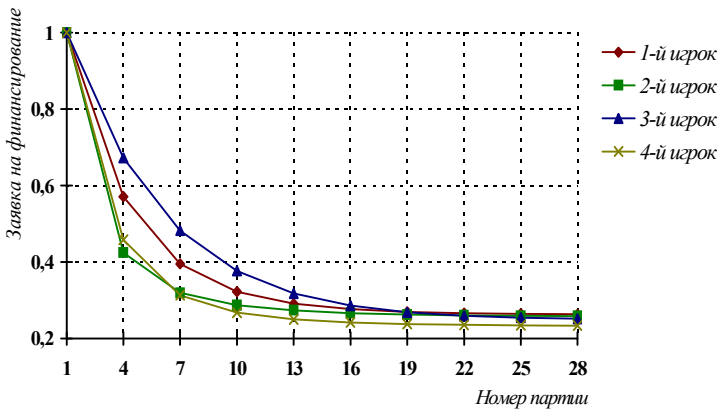


Рис. 59

Изменение общего уровня безопасности в системе из четырех предприятий представлено на Рис. 60.

Сравнение результатов двух экспериментов показывает, что переход от процедуры пропорционального распределения финансовых средств к процедуре распределения на основе принципа обратных приоритетов позволил незначительно увеличить общий уровень безопасности.

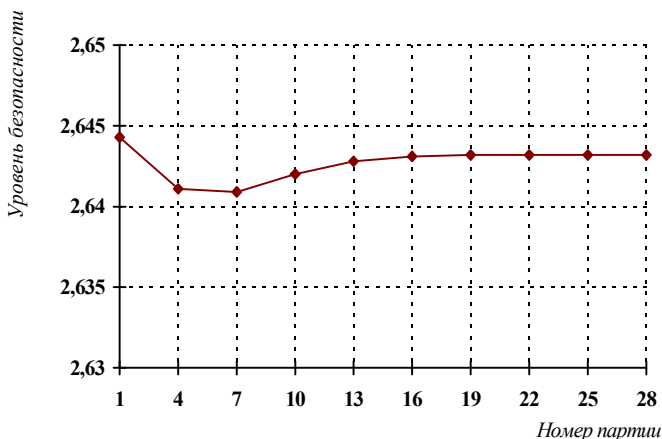


Рис. 60

Конкурсные механизмы распределения финансовых средств. Особенность конкурсных механизмов состоит в том, что они требуют организации явного соперничества между участниками конкурса. В число победителей конкурса входят те предприятия, которые имеют наибольшие показатели эффективности использования выделяемых средств на выполнение работ, по обеспечению требуемого уровня безопасности. Победители конкурса получают определенный приоритет при распределении финансовых средств. Следует отметить, что при организации конкурса предприятия сообщают в центр не только заявку на объем финансирования, но и ожидаемую величину эффекта от выполнения требуемых мероприятий. То есть для достижения своих целей они уже могут «играть» на двух видах информации.

Пусть

m' – количество предприятий-победителей конкурса;

w_i – оценка ожидаемого эффекта i -го предприятия;

ε_i – оценка эффективности i -го предприятия: $\varepsilon_i = \frac{w_i}{S_i}$;

V_0 – минимальный размер финансовых средств, выделенных предприятиям, не вошедшим в число победителей;

χ_i – функция штрафа за недостижение (или за превышение) ожидаемого эффекта i -м предприятием:

$$\chi_i = \begin{cases} \mu [\varepsilon_i - h_i(\hat{r}_i, V_i)] & \text{если } w_i - h_i(\hat{r}_i, V_i) > 0, V_i = s_i, \\ 0, & \text{если } w_i - h_i(\hat{r}_i, V_i) \leq 0; \end{cases}$$

μ – коэффициент штрафа.

Отметим, что штрафы налагаются лишь на те предприятия, которые получили запрашиваемые финансовые средства в полном объеме. Под *конкурсными механизмами* будем понимать механизмы распределения финансовых средств, в которых процедура планирования включает этап определения множества Q' предприятий-победителей конкурса. Это множество содержит номера предприятий с наибольшими оценками эффективности.

Алгоритм определения множества Q' может быть представлен следующим образом. Упорядочим оценки эффективности предприятий $\varepsilon_i, i \in Q$ по убыванию, то есть

$$(6) \varepsilon_{i_1} > \varepsilon_{i_2} > \dots > \varepsilon_{i_n}.$$

Множество предприятий-победителей конкурса есть

$$Q' = \{i_k: k \leq m'\}, \text{ где } m' < n.$$

Процедура распределения финансовых средств после определения множества победителей имеет вид

$$V_{i_k} = \begin{cases} s_{i_k}, & \text{если } 1 \leq i_k \leq m', \\ R_0 - \sum_{k=1}^{m'} s_{i_k} - V_0(n - m' - 2), & \text{если } i_k = m' + 1, \\ V_0, & \text{если } m' + 2 \leq i_k \leq n. \end{cases}$$

В особом положении при этом находится предприятие с номером $m' + 1$. Оно является лучшим среди проигравших конкурс, и поэтому может получить финансовых средств несколько больше чем V_0 .

Как сказано выше, в рассматриваемой модели предусмотрено наказание предприятия за недостижение (или за завышение) ожидаемого эффекта, поэтому целевая функция i -го предприятия имеет вид $\tilde{f}_i = f_i - \chi_i$, или

$$(7) \tilde{f}(r_i, V_i) = V_i \left(1 - \frac{\hat{r}_i}{2r_i} \right) - \begin{cases} \mu(\varepsilon_i - \sqrt{\hat{r}_i V_i}), & \text{если } \varepsilon_i - \sqrt{\hat{r}_i V_i} > 0 \\ 0, & \text{если } \varepsilon_i - \sqrt{\hat{r}_i V_i} \leq 0 \end{cases}$$

В игре важным моментом является процедура определения победителей конкурса. Очевидно, что в каждой партии игры количество победителей может быть разным. Действительно, если центр пер-

воначально определяет минимальный размер финансовых средств V_0 для предприятий, не вошедших в число победителей, то количество победителей можно определить в соответствии со следующей процедурой. Из упорядоченных оценок эффективности (6) выбирается максимальное число предприятий m' , для которых справедливо неравенство

$$(8) \sum_{k=1}^{m'} s_{i_k} < R_0 - V_0(n - m'),$$

и это число m' определяет количество победителей в данной партии игры.

Из процедуры определения победителей в общем случае следует, что возможен случай, когда имеется лишь один победитель конкурса, но и он не получает запрашиваемого количества финансовых средств, т.е. неравенство (8) в этом случае имеет вид $R_0 - V_0(n - 1) < s_{i_1}$. В этом случае победителем конкурса объявляется предприятие под номером i_1 и ему передается весь остаток финансовых средств.

Подробный анализ формальной модели конкурсного механизма приведен в [20]. Здесь отметим лишь, что для целевой функции вида (7) равновесная по Нэшу ситуация существует, причем вид ситуации равновесия определяется величиной коэффициента μ в функции штрафа $\chi_i(\cdot)$. Величина μ определяет сильный штраф для i -го предприятия, если ему в любой ситуации, оказывается, невыгодно отклоняться от заявленной величины ожидаемого эффекта ε_i . В случае же слабого штрафа предприятие может отклониться от оценки ожидаемого эффекта и при этом выиграть больше, чем, если бы он придерживался условия $\varepsilon_i = \sqrt{\hat{r}_i V_i}$.

Каждая партия игры проводится в четыре этапа. На первом этапе участники игры сообщают в центр свои заявки на финансирование s_i и ожидаемый эффект ε_i от выполнения работ по обеспечению требуемого уровня безопасности.

Второй этап – этап определения участников-победителей. На этом этапе центр на основе полученных заявок определяет участников-победителей с наибольшими оценками эффективности.

На этапе распределения (третий этап) центр на основе полученных оценок рассчитывает объем финансирования V_i для участников игры.

На четвертом этапе – участники, получив свой объем финансирования, подсчитывают значения своих целевых функций.

На этом партия считается законченной, и следует переходить к следующей партии. То есть участники вновь сообщают в центр заявки на финансирование, центр обрабатывает полученную информацию и т.д.

Партии игры повторяется до тех пор, пока достаточно явно не проявится стратегия поведения участников игры.

Игровой эксперимент по конкурсному распределению финансовых средств, проводился не с автоматами, а с реальными игроками. Одной из причин привлечения реальных игроков, несмотря на серьезные организационные сложности, является отсутствие достаточно хорошо обоснованной гипотезы поведения человека в подобной ситуации, именно в случае, когда он может «играть» на двух типах информации. И, как следствие этого, отсутствует соответствующий алгоритм поведения автомата.

В игре участвовали четыре игрока, значения коэффициентов r_i , \hat{r}_i и R_0 такие же, как и в предыдущих экспериментах. Кроме того, $V_0 = 0,1$ и $\mu = 0,5$.

Эксперимент с реальными игроками занимает существенно больше времени, причем как времени проведения одной партии игры, так и времени проведения всего игрового эксперимента. Это связано с тем, что скорость сходимости в равновесную ситуацию, если она существует, в экспериментах, проводимых с реальными игроками, как правило, ниже, чем в играх с автоматами. Поэтому результаты проведения эксперимента представлены сначала в виде таблиц (см. Табл. 15) характеризующих развитие ситуации в первых десяти партиях, а затем в виде графиков по результатам шестидесяти четырех партий.

Табл. 15. Результаты проведения первых десяти партий игры

Партия № 1	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,600	0,500	0,400	0,300
	Оценка эффекта	1,000	0,970	0,820	0,640
	Эффективность	1,667	1,940	2,050	2,133
	Место в конкурсе	4	3	2	1
	Полученные средства	0,100	0,200	0,400	0,300
	Уровень безопасности	0,447	0,616	0,825	0,648
	Штраф				
	Целевая функция	0,033	0,073	0,264	0,216

Партия № 2	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,550	0,430	0,450	0,370
	Оценка эффекта	1,000	0,900	0,860	0,700
	Эффективность	1,818	2,093	1,911	1,892
	Место в конкурсе	4	1	2	3
	Полученные средства	0,100	0,430	0,370	0,100
	Уровень безопасности	0,447	0,904	0,793	0,374
	Штраф				
Целевая функция	0,033	0,158	0,244	0,072	

Партия № 3	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,450	0,460	0,440	0,330
	Оценка эффекта	0,950	0,920	0,850	0,690
	Эффективность	2,111	2,000	1,932	2,091
	Место в конкурсе	1	3	4	2
	Полученные средства	0,450	0,120	0,100	0,330
	Уровень безопасности	0,949	0,477	0,412	0,680
	Штраф	0,001			0,005
Целевая функция	0,149	0,044	0,066	0,232	

Партия № 4	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,460	0,470	0,440	0,350
	Оценка эффекта	0,960	0,900	0,800	0,740
	Эффективность	2,087	1,915	1,818	2,114
	Место в конкурсе	2	3	4	1
	Полученные средства	0,450	0,100	0,100	0,350
	Уровень безопасности	0,949	0,436	0,412	0,700
	Штраф				0,020
Целевая функция	0,150	0,037	0,066	0,232	

Партия № 5	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,470	0,440	0,410	0,350
	Оценка эффекта	0,970	0,910	0,820	0,710
	Эффективность	2,064	2,068	2,000	2,029
	Место в конкурсе	2	1	4	3
	Полученные средства	0,360	0,440	0,100	0,100
	Уровень безопасности	0,849	0,914	0,412	0,374
	Штраф				
Целевая функция	0,120	0,161	0,066	0,072	

Партия № 6	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,470	0,450	0,400	0,340
	Оценка эффекта	0,990	0,920	0,830	0,690
	Эффективность	2,106	2,044	2,075	2,029
	Место в конкурсе	1	3	2	4
	Полученные средства	0,140	0,450	0,100	0,310
	Уровень безопасности	0,529	0,925	0,412	0,659
	Штраф	0,010			
Целевая функция	0,146	0,037	0,218	0,072	

Партия № 7	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,475	0,450	0,400	0,310
	Оценка эффекта	0,990	0,950	0,820	0,670
	Эффективность	2,084	2,111	2,050	2,161
	Место в конкурсе	3	2	4	1
	Полученные средства	0,140	0,450	0,100	0,310
	Уровень безопасности	0,529	0,925	0,412	0,659
	Штраф	0,000	0,013	0,000	0,006
Целевая функция	0,047	0,152	0,066	0,218	

Партия № 8	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,450	0,455	0,390	0,300
	Оценка эффекта	0,960	0,940	0,820	0,660
	Эффективность	2,133	2,066	2,103	2,200
	Место в конкурсе	2	4	3	1
	Полученные средства	0,450	0,100	0,150	0,300
	Уровень безопасности	0,949	0,436	0,505	0,648
	Штраф	0,006			0,006
Целевая функция	0,144	0,037	0,099	0,210	

Партия № 9	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,450	0,420	0,380	0,310
	Оценка эффекта	0,960	0,900	0,820	0,670
	Эффективность	2,133	2,143	2,158	2,161
	Место в конкурсе	4	3	2	1
	Полученные средства	0,100	0,210	0,380	0,310
	Уровень безопасности	0,447	0,632	0,804	0,659
	Штраф			0,008	0,006
Целевая функция	0,033	0,077	0,243	0,218	

Партия № 10	Номер игрока	1	2	3	4
	Заявка на финансирование	0,420	0,400	0,390	0,320
	Оценка эффекта	0,930	0,880	0,820	0,670
	Эффективность	2,214	2,200	2,103	2,094
	Место в конкурсе	1	2	3	4
	Полученные средства	0,420	0,380	0,100	0,100
	Уровень безопасности	0,917	0,850	0,412	0,374
	Штраф	0,007			
	Целевая функция	0,133	0,139	0,066	0,072

Из Табл. 15 следует, что в своих поступках игроки руководствуются как бы двумя критериями:

- войти в число победителей конкурса;
- минимизировать штрафы за завышенную оценку ожидаемого эффекта.

В начале игры, в каждой партии имеются, как правило, два победителя конкурса и два проигравших, заявки на финансирование почти в полтора раза превышают распределяемые финансовые средства. В конце игры ситуация меняется – заявки на финансирование соизмеримы с величиной распределяемых финансовых средств, число победителей конкурса увеличивается. На Рис. 61 представлен график изменения заявок на финансирование деятельности по достижению и подержанию требуемого уровня безопасности.

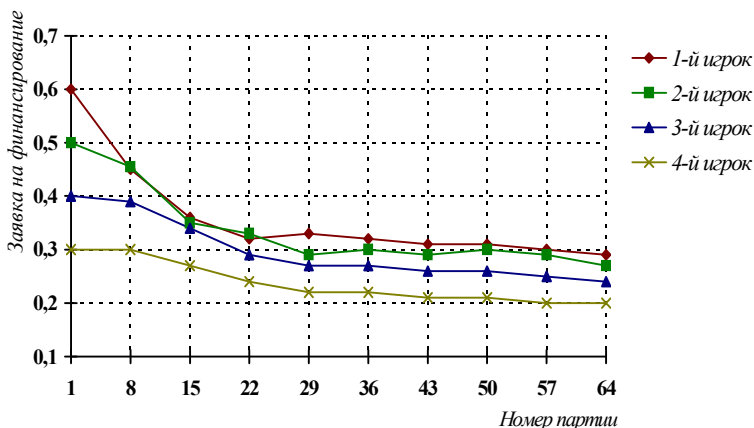


Рис. 61

Соответственно на Рис. 62 изображен график изменения оценок ожидаемого эффекта от использования запрашиваемых финансовых средств.

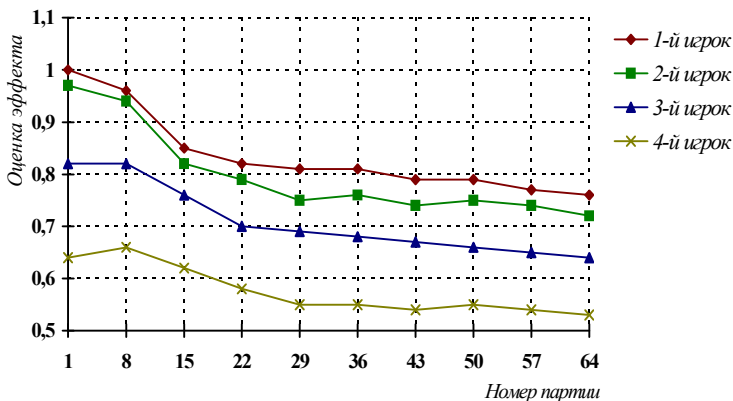


Рис. 62

График изменение общего уровня безопасности в системе, состоящей из четырех предприятий, при конкурсном распределении финансовых средств представлен на Рис. 63.

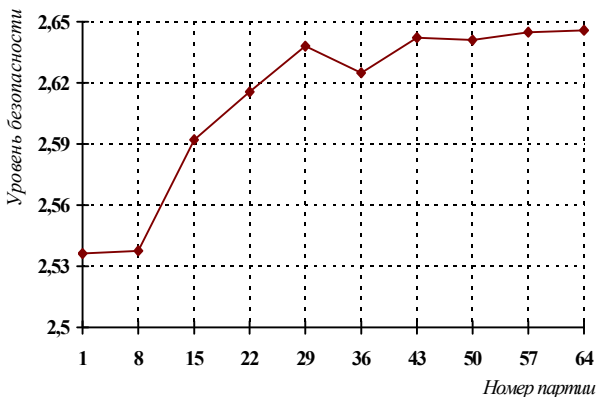


Рис. 63

Сравнение этого результата с результатами двух предыдущих экспериментов показывает, что в конкурсном механизме общий

уровень безопасности при одних и тех же характеристиках предприятий и одной и той же величине финансовых средств оказался наибольшим.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что пропорциональное распределение централизованного фонда приводит к неоправданному росту заявок и снижает эффективность всего механизма распределения. Конкурс при распределении централизованного фонда повышает эффективность этого механизма и обеспечивает получение информации, близкой к достоверной.

4.5. ИМИТАЦИОННАЯ ИГРА «МЕХАНИЗМЫ КОМПЕНСАЦИИ ЗАТРАТ НА СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ РИСКА»

В настоящем разделе, так же, как и в рассмотренных выше играх, предполагается, что затраты i -го предприятия на достижение уровня безопасности y_i определяются выражением (1) раздела 4.2. Каждому предприятию компенсируются его затраты на обеспечение заданного уровня безопасности, причем размер компенсации определяется выражением

$$(1) \widehat{\varphi}_i = \frac{y_i^2}{2s_i}.$$

Целевой функцией предприятия является разность получаемых средств (1) и фактически затраченных, то есть:

$$(2) f_i = \widehat{\varphi}_i - \varphi_i = \frac{y_i^2}{2s_i} - \frac{y_i^2}{2r_i} = \frac{y_i^2}{2} \left(\frac{1}{s_i} - \frac{1}{r_i} \right)$$

Ниже приводятся результаты игрового эксперимента, в котором участвовали четыре игрока ($n = 4$), а исходные данные такие же, как в рассмотренных выше экспериментах. То есть $X = 3$, $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 2,5$, $r_4 = 2,5$, $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,2$, $\gamma_4 = 0,4$, $M = 1$ и $s_i \in [0,4; 4]$.

Задача участников игры заключается в максимизации разности полученной компенсации и фактически потраченных средств на достижение требуемого уровня безопасности. Стратегии игроков для этого варианта игры представлены на графике, изображенном на Рис. 64.

Из Рис. 64 следует, что стратегии игроков сошлись в равновесную ситуацию и $s_1^* = s_2^* = 0,55$, а $s_3^* = s_4^* = 0,75$. Теоретическое исследование модели (при выполнении гипотезы слабого влияния) показало

ло, что в ситуации равновесия все предприятия сообщают оценку $s_i^* = r_i / 2$, то есть в два раза завышают оценку величины упущенной выгоды при отвлечении средств на обеспечение требуемого уровня безопасности.

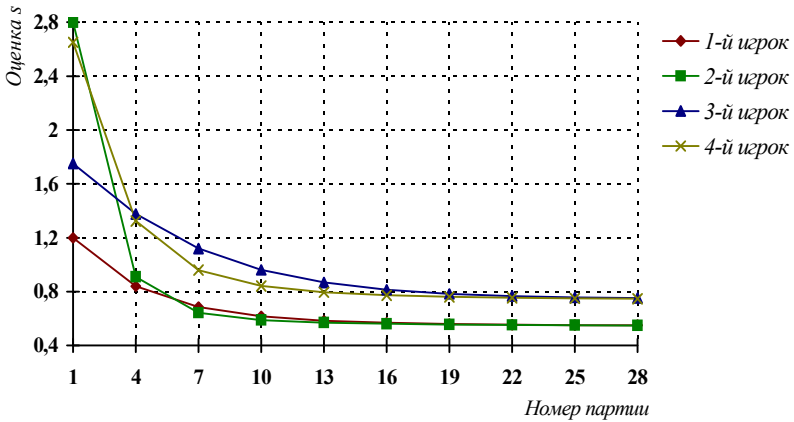


Рис. 64

Таким образом, расхождение равновесных значений s_i^* и теоретически предсказанных значений равновесных оценок составило для первых двух игроков 6,7 % и 10 % для других двух игроков. Сумма средств, выплачиваемая предприятиям при механизме компенсации равна 1,73, в то время как сумма средств, выплачиваемая предприятиям при действии механизма стимулирования равна 1,74.

Проведение аналогичных игровых экспериментов, но только с участием восьми игроков, при условии, что $X=6$, $r_1=1,5$, $r_2=1,5$, $r_3=2,5$, $r_4=2,5$, $r_5=1,5$, $r_6=1,5$, $r_7=2,5$, $r_8=2,5$, $\gamma_1=0,3$, $\gamma_2=0,5$, $\gamma_3=0,2$, $\gamma_4=0,4$, $\gamma_5=0,3$, $\gamma_6=0,5$, $\gamma_7=0,2$, $\gamma_8=0,4$, $s_i \in [0,4; 4]$, дали следующие результаты.

Сумма средств, выплачиваемая предприятиям при механизме компенсации, равна 2,65, что совпадает с суммой средств, выплачиваемых предприятиям при действии механизма стимулирования.

Стратегии игроков представлены на графике, изображенном на Рис. 65.

Из Рис. 65 видно, что стратегии игроков в ситуации равновесия $s_1^* = s_2^* = s_5^* = s_6^* = 0,67$, а $s_3^* = s_4^* = s_7^* = s_8^* = 1,03$. Расхождение равновесных значений s_i^* и значений теоретически рассчитанных равно-

весных оценок составило для первого, второго, четвертого и пятого игроков 2,7 % и 4,5 % для остальных игроков.

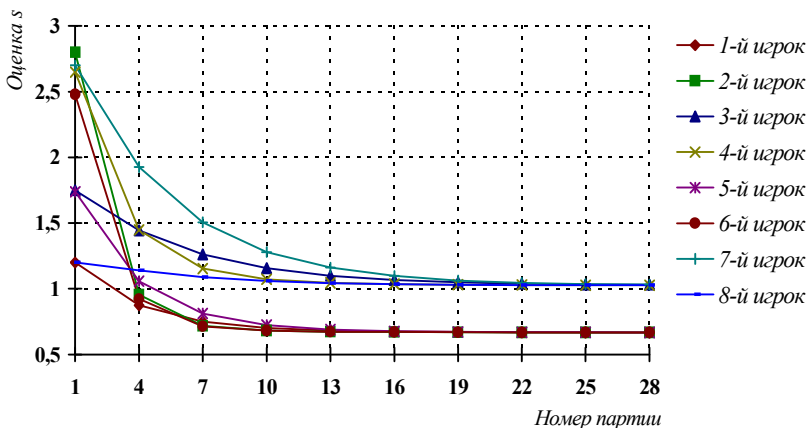


Рис. 65

Интерес также представляют результаты, полученные для случая формирования планового уровня безопасности при наличии ограничений на величину планового уровня отдельного предприятия.

Для случая, когда в игровом эксперименте участвовали четыре автомата, при тех же исходных условиях изменение стратегии их поведения представлено на Рис. 66. Видно, что в равновесной ситуации стратегии автоматов отличаются от стратегий в аналогичной ситуации при менее жестких ограничениях на u_i . Суммарные затраты на компенсацию в этом случае составили 1,94, что превышает аналогичные затраты на 11,5 % для предыдущего случая.

На Рис. 67 представлен график изменения стратегии автоматов, при проведении экспериментов с восемью участниками игры.

Ситуация, в которую сошлись автоматы при том же положении цели, что и в предыдущем случае, характеризуется тем, что сумма компенсации составила 3,14. В то время как при ограничении на величину планового уровня безопасности отдельного предприятия $M = 1$, размер компенсации составлял 2,65. То есть, рост составил 18,5 %.

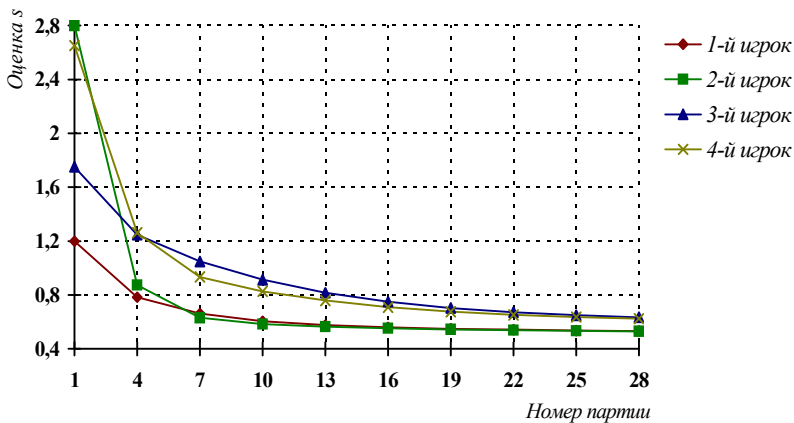


Рис. 66

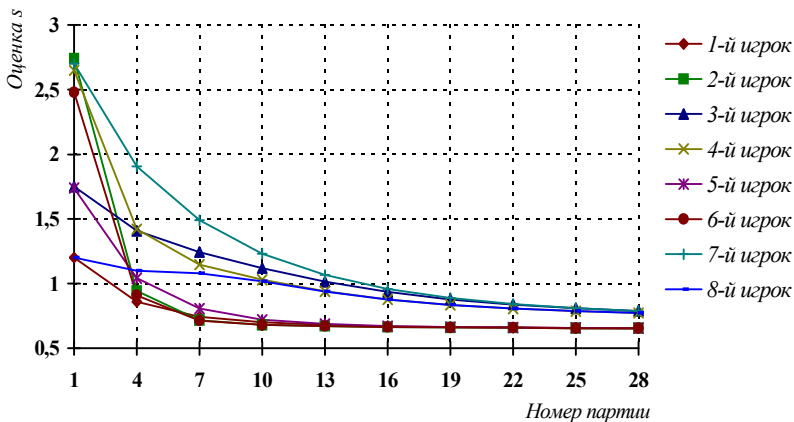


Рис. 67

4.6. ИМИТАЦИОННАЯ ИГРА «МЕХАНИЗМЫ ПРОДАЖИ КВОТ НА УРОВЕНЬ РИСКА»

Принципиальное отличие описываемой в настоящем разделе игры от игр, рассмотренных в настоящей главе выше, заключается в том, что в модели этой игры отражена зависимость объема выпус-

каемой продукции и уровня безопасности. И, как следствие, показано влияние требований к безопасности на прибыль предприятия.

В модели рассматривается регион, на территории которого расположены промышленные предприятия. Хозяйственная деятельность предприятий оказывает существенное влияние на уровень безопасности региона.

Ответственность за безопасность региона возложена на местные органы власти (центр). Полномочия, которыми располагает, центр следующие: распределение между предприятиями централизованного фонда на природоохранную деятельность, формирование квот на загрязнение и наложение штрафа на предприятия за превышение квот.

С помощью игры проводится сравнительный анализ уровня безопасности в регионе при действии различных экономических регуляторов.

В данной игре роль центра сводится к выбору такого экономического механизма, который позволяет поддерживать требуемый уровень безопасности и обеспечивает выпуск необходимого объема продукции.

Введем следующие обозначения: q_i – объем продукции, обеспечивающий i -му предприятию минимальную себестоимость, u_i – объем продукции, выпускаемый на i -м предприятии, r_i – минимальная себестоимость, x_i – квота на УБ, полученная i -м предприятием; y_i – фактический УБ, связанный с деятельностью i -го предприятия.

Целевая функция (прибыль) i -го предприятия:

$$f_i = c_i u_i - \frac{1}{2} r_i q_i \left(\frac{u_i^2}{r_i^2} + 1 \right)$$

В модели предполагается, что уровень риска на предприятии возрастает с ростом объема выпуска продукции и понижается с ростом размеров средств, направляемых на проведение мероприятий

по поддержанию УБ: $y_i = \frac{du_i}{1 + bv_i}$, где d и b – известные коэффициенты.

Функция штрафа за превышение разрешенного уровня риска

$$\chi_i = \begin{cases} \mu(y_i - x_i), & \text{если } y_i \geq x_i \\ 0, & \text{если } y_i < x_i \end{cases}$$

Остаточная прибыль i -го предприятия определяется выражением

$$\Pi_i = f_i - \chi_i - I v_i$$

где $I = 0$, если средства, направляемые на обеспечение безопасности, поступают из централизованных фондов, и $I = 1$, если средства выделяются из прибыли предприятия.

Рассмотрим два способа управления уровнем безопасности в регионе. Первый способ представляет собой распределение квот R на допустимый уровень риска между предприятиями региона. Второй способ заключается в распределении централизованного фонда R_0 на обеспечение безопасности.

Предположим сначала, что квоты на уровень риска и централизованное финансирование отсутствуют. Тогда целевая функция i -го игрока может быть представлена в виде

$$\Pi_i = c_i u_i - \frac{1}{2} r_i q_i \left(\frac{u_i^2}{r_i^2} + 1 \right) - d \mu u_i.$$

Величину $d \mu u_i$ можно уже рассматривать не как функцию штрафа, а как плату за риск. Оптимальный объем выпуска продукции, позволяющий получить максимум прибыли определяется выражением $u_i = \frac{r_i(c_i - d \mu)}{q_i}$. Очевидно, что всегда должно выполняться

условие $c_i > d \mu$. Прибыль i -го игрока будет равна

$$\Pi_i = \frac{1}{2} r_i q_i (c_i - d \mu - q_i^2),$$

а уровень риска от деятельности i -го предприятия: $y_i = \frac{d r_i (c_i - d \mu)}{q_i}$. Соответственно общий объем

выпуска продукции в регионе будет $U = \sum_{i=1}^n \frac{r_i c_i}{q_i} - d \mu \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{q_i}$, а ожи-

даемый ущерб в регионе: $W = d \sum_{i=1}^n W_i \frac{r_i c_i}{q_i} - d \mu \sum_{i=1}^n W_i \frac{r_i}{q_i}$

Предположим теперь, что для региона задан общий уровень риска R и между предприятиями региона распределяются квоты x_i ,

$i \in Q$, из условия, что $\sum_{i=1}^n x_i = R$.

В игре рассматриваются два варианта определения квот:

- 1) механизм пропорционального распределения;
- 2) конкурсный механизм.

Механизм пропорционального распределения квот записывается

$$\text{в виде } x_i = \begin{cases} s_i, & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j \leq R, \\ \frac{s_i}{\sum_{j=1}^n s_j} R, & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j > R. \end{cases}$$

При конкурсном распределении квот заявки сначала упорядочиваются по возрастанию. Не ограничивая общности, будем считать $s_1 < s_2 < s_3 < \dots < s_n$. После этого определение квот осуществляется следующим образом.

$$\text{Если } s_1 \leq R, \quad \text{то } x_1 = s_1;$$

$$s_2 \leq R - x_1, \quad x_2 = s_2;$$

...

$$s_k \leq R - \sum_{j=1}^{k-1} x_j, \quad x_k = s_k;$$

$$s_{k+1} > R - \sum_{j=1}^k x_j, \quad x_{k+1} = R - \sum_{j=1}^k x_j.$$

Принципы распределения централизованного фонда R_0 на природоохранную деятельность такие же, как и при распределении квот на загрязнение: пропорциональное распределение и конкурсный механизм.

Игра проводилась при следующих условиях: $n = 4$; $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 10$; $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 15$; $d = 0,3$; $b = 0,005$; $\mu = 20$; $R = 100$; $r_1 = r_2 = 80$; $r_3 = r_4 = 120$.

Пропорциональное распределение квот

Партия №1

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	30.0	40.0	50.0	60.0	180.0
Квоты	17.0	22.0	28.0	33.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	98.7	0.0	92.4	0.0	191.1
Прибыль	257.0	356.0	442.0	534.0	1589.0

Партия №2

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	45.0	50.0	90.0	80.0	265.0
Квоты	17.0	19.0	34.0	30.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	92.4	54.6	0.0	44.2	191.2
Прибыль	264.0	301.0	534.0	490.0	1589.0

Партия №3

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	60.0	80.0	110.0	120.0	370.0
Квоты	16.0	22.0	30.0	32.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	107.7	0.0	53.4	0.0	161.1
Прибыль	248.0	356.0	481.0	534.0	1519.0

Партия №4

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	75.0	80.0	115.0	120.0	390.0
Квоты	19.0	21.0	29.0	31.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	47.4	21.7	58.3	32.6	160.0
Прибыль	309.0	334.0	476.0	501.0	1620.0

Результаты проведенных четырех партий игры показывают, что для рассматриваемой ситуации уровень риска в регионе определяется не процедурой распределения квот, а зависит от общего объема квот и величины штрафов за превышение разрешенного уровня риска. Игра показывает, что при пропорциональном распределении растет лишь объем заявок на квоты.

Конкурсный механизм распределения квот

Партия №1

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	30.0	40.0	50.0	60.0	180.0
Квоты	30.0	40.0	30.0	0.0	100.0
Объем выпуска	72.0	120.0	108.0	108.0	408.0
Уровень риска	22.0	36.0	32.0	32.0	122.0
Штраф	0.0	0.0	48.0	648.0	696.2
Прибыль	356.0	500.0	486.0	-114.0	1228.0

Партия №2

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	25.0	40.0	45.0	50.0	160.0
Квоты	25.0	40.0	35.0	0.0	100.0
Объем выпуска	72.0	120.0	108.0	108.0	408.0
Уровень риска	22.0	36.0	32.0	32.0	122.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	648.0	648.0
Прибыль	356.0	500.0	534.0	-114.0	1276.0

Партия №3

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	25.0	40.0	35.0	38.0	138.0
Квоты	25.0	2.0	35.0	38.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	0.0	392.0	0.0	0.0	392.0
Прибыль	356.0	-36.0	534.0	534.0	1388.0

Партия №4

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	25.0	37.0	35.0	38.0	135.0
Квоты	25.0	37.0	35.0	3.0	100.0
Объем выпуска	72.0	120.0	108.0	108.0	408.0
Уровень риска	22.0	36.0	32.0	32.0	122.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	588.0	588.0
Прибыль	356.0	500.0	534.0	-54.0	1336.0

Партия №5

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	25.0	37.0	35.0	35.0	132.0
Квоты	25.0	5.0	35.0	35.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	0.0	332.0	0.0	0.0	332.0
Прибыль	356.0	24.0	534.0	534.0	1448.0

...

Партия №8

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Заявка на квоты	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Квоты	22.0	22.0	32.0	24.0	100.0
Объем выпуска	72.0	72.0	108.0	108.0	360.0
Уровень риска	22.0	22.0	32.0	32.0	108.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	168.0	168.0
Прибыль	356.0	356.0	526.0	366.0	1604.0

Результаты проведения игры при конкурсном распределении квот подтверждают предыдущие выводы о том, что уровень риска по региону в целом и общий объем выпускаемой продукции определяются только суммарным размером квот и величиной штрафа. В то же время, для случая, когда игроки часть своей прибыли используют на природоохранную деятельность (на обеспечение заданного уровня риска) ситуация меняется. В предлагаемом варианте игры первые два предприятия получили квоты по 20 условных единиц, а два других предприятия – по 30 условных единиц. Таким образом, суммарный размер квот составляет 100 единиц. Все остальные параметры модели остаются прежними. В таблице часть прибыли, направляемая на природоохранную деятельность, записываются в графе «Затраты».

Партия №1

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Затраты	30.0	40.0	50.0	60.0	180.0
Объем выпуска	78.0	80.0	122.0	125.0	405.0
Уровень риска	19.6	20.0	29.0	29.0	97.6
Штраф	8.3	0.0	0.0	0.0	8.3
Прибыль	353.0	360.0	562.0	562.0	1837.0

Партия №2

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Затраты	40.0	50.0	60.0	70.0	220.0
Объем выпуска	80.0	82.0	125.0	127.0	414.0
Уровень риска	20.0	20.0	29.0	28.0	97.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Прибыль	360.0	358.0	562.0	561.0	1841.0

Партия №3

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Затраты	43.0	41.0	60.0	58.0	202.0
Объем выпуска	80.0	80.0	125.0	124.0	409.0
Уровень риска	20.0	20.0	29.0	29.0	98.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3
Прибыль	359.0	359.0	562.0	562.0	1842.0

Партия №4

Номер игрока	1	2	3	4	Сумма
Затраты	42.0	41.0	55.0	50.0	188.0
Объем выпуска	80.0	80.0	124.0	122.0	406.0
Уровень риска	20.0	20.0	29.0	29.0	98.0
Штраф	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Прибыль	360.0	360.0	562.0	562.0	1844.0

Из приведенных результатов следует, что в третьем варианте игры уровень риска в регионе понизился более чем на 9 % по сравнению с первыми двумя вариантами. А объем суммарного выпуска увеличился более чем на 12 %.

Результаты проведенного имитационного эксперимента показывают, что пропорциональное распределение централизованного фонда приводит к неоправданному росту заявок и снижает эффективность всего механизма распределения. Конкурс при распределении централизованного фонда повышает эффективность этого механизма и обеспечивает получение информации близкой к достоверной.

В целом, подводя итоги четвертой главы, можно сделать вывод, что разработанная система игрового имитационного моделирования для оценки эффективности механизмов управления ЭкЭС позволяет в достаточно простой и, в то же время, наглядной форме продемонстрировать особенности разрабатываемых механизмов, их достоинства и недостатки, определить направления работ для их «доводки» до конкретных условий конкретных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен комплекс оптимизационных, теоретико-игровых и имитационных моделей механизмов управления ЭкЭС, включающий:

- механизмы комплексного оценивания интегрального риска и ущерба (разделы 1.2 и 1.3);
- механизмы штрафов (раздел 2.1);
- механизмы платы за риск (разделы 2.2, 3.2 и 4.2);
- механизмы финансирования снижения уровня риска (разделы 2.3, 3.3, 4.3 и 4.4);
- механизмы компенсации затрат на снижение уровня риска (разделы 2.4, 3.4 и 4.5);
- механизмы продажи квот на уровень риска (разделы 3.5 и 4.6);
- механизмы страхования (разделы 2.5 и 3.6);
- механизмы аудита (раздел 2.6);
- механизмы снижения ожидаемого ущерба (раздел 2.7);
- механизмы экономической мотивации (раздел 3.7);
- механизмы оптимизации региональных программ (разделы 1.3 и 3.1);
- механизмы согласования интересов органов управления (раздел 3.8).

Проведенный анализ свидетельствует, что очень многие модели механизмов управления, созданные в рамках теории управления организационными и социально-экономическими системами (см., например, [98]), могут (с соответствующей адаптацией) эффективно использоваться при разработке и исследовании моделей механизмов управления ЭкЭС. Поэтому «перенос» и развитие соответствующих результатов (в первую очередь, наверное, моделей информационного управления [93, 100] и динамических моделей адаптации экономиче-

ских субъектов [93]) является одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

Другим таким направлением, несомненно, является разработка и идентификация новых механизмов, адекватно учитывающих специфику ЭкЭС различного масштаба.

Третьим направлением является интеграция результатов моделирования механизмов управления ЭкЭС и подходов различных научных направлений, имеющих предметом исследований ЭкЭС (см. введение).

И, наконец, актуальным является массовое внедрение (при наличии соответствующих институциональных условий) и проверка эффективности организационных и экономических механизмов управления ЭкЭС, их настройка к конкретным условиям функционирования регионов и предприятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕРМИНОЛОГИЯ

(согласно [23, 149, 151]).

Антропогенный объект – объект, созданный человеком для обеспечения его социальных потребностей и не обладающий свойствами природных объектов.

Благоприятная окружающая среда – окружающая среда, качество которой обеспечивает устойчивое функционирование естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов;

Вред окружающей среде – негативное изменение окружающей среды в результате ее загрязнения, повлекшее за собой деградацию естественных экологических систем и истощение природных ресурсов.

Временно согласованный выброс – временный лимит выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух, который устанавливается для действующих стационарных источников выбросов с учетом качества атмосферного воздуха и социально-экономических условий развития соответствующей территории в целях поэтапного достижения установленного предельно допустимого выброса.

Государственный мониторинг окружающей среды (государственный экологический мониторинг) – мониторинг окружающей среды, осуществляемый органами государственной власти Российской Федерации и органами государственной власти субъектов Российской Федерации в соответствии с их компетенцией.

Естественная экологическая система – объективно существующая часть природной среды, которая имеет пространственно-территориальные границы и в которой живые (растения, животные и другие организмы) и неживые ее элементы взаимодействуют как единое функциональное целое и связаны между собой обменом веществом и энергией.

Загрязнение окружающей среды – поступление в окружающую среду вещества и (или) энергии, свойства, местоположение или количество которых оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Загрязняющее вещество – вещество или смесь веществ, количество и (или) концентрация которых превышают установленные для химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и

микроорганизмов нормативы и оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Использование природных ресурсов – эксплуатация природных ресурсов, вовлечение их в хозяйственный оборот, в том числе все виды воздействия на них в процессе хозяйственной и иной деятельности.

Качество окружающей среды – состояние окружающей среды, которое характеризуется физическими, химическими, биологическими и иными показателями и (или) их совокупностью.

Компоненты природной среды – земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле.

Контроль в области охраны окружающей среды (экологический контроль) – система мер, направленная на предотвращение, выявление и пресечение нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обеспечение соблюдения субъектами хозяйственной и иной деятельности требований, в том числе нормативов и нормативных документов, в области охраны окружающей среды.

Лимиты на выбросы и сбросы загрязняющих веществ и микроорганизмов (лимиты на выбросы и сбросы) – ограничения выбросов и сбросов загрязняющих веществ и микроорганизмов в окружающую среду, установленные на период проведения мероприятий по охране окружающей среды, в том числе внедрения наилучших существующих технологий, в целях достижения нормативов в области охраны окружающей среды.

Мониторинг окружающей среды (экологический мониторинг) – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов.

Наилучшая существующая технология – технология, основанная на последних достижениях науки и техники, направленная на снижение негативного воздействия на окружающую среду и имеющая установленный срок практического применения с учетом экономических и социальных факторов.

Негативное воздействие на окружающую среду – воздействие хозяйственной и иной деятельности, последствия которой приводят к негативным изменениям качества окружающей среды.

Нормативы в области охраны окружающей среды (природоохранные нормативы) – установленные нормативы качества окружающей среды и нормативы допустимого воздействия на нее, при соблюдении которых обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем и сохраняется биологическое разнообразие.

Нормативы допустимого воздействия на окружающую среду – нормативы, которые установлены в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и при которых соблюдаются нормативы качества окружающей среды.

Нормативы допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду – нормативы, которые установлены в соответствии с величиной допустимого совокупного воздействия всех источников на окружающую среду и (или) отдельные компоненты природной среды в пределах конкретных территорий и (или) акваторий и при соблюдении которых обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем и сохраняется биологическое разнообразие.

Нормативы допустимых выбросов и сбросов химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов (нормативы допустимых выбросов и сбросов веществ и микроорганизмов) – нормативы, которые установлены для субъектов хозяйственной и иной деятельности в соответствии с показателями массы химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов, допустимых для поступления в окружающую среду от стационарных, передвижных и иных источников в установленном режиме и с учетом технологических нормативов, и при соблюдении которых обеспечиваются нормативы качества окружающей среды.

Нормативы допустимых физических воздействий – нормативы, которые установлены в соответствии с уровнями допустимого воздействия физических факторов на окружающую среду и при соблюдении которых обеспечиваются нормативы качества окружающей среды.

Нормативы качества окружающей среды – нормативы, которые установлены в соответствии с физическими, химическими, биологическими и иными показателями для оценки состояния окружающей среды и при соблюдении которых обеспечивается благоприятная окружающая среда.

Нормативы предельно допустимых концентраций химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов (нормативы предельно допустимых концентраций) – нормативы, которые установлены в соответствии с показателями предельно допустимого содержания химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов в окружающей среде и несоблюдение которых может привести к загрязнению окружающей среды, деградации естественных экологических систем.

Окружающая среда – совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов.

Охрана окружающей среды – деятельность органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, общественных и иных некоммерческих объединений, юридических и физических лиц, направленная на сохранение и восстановление природной среды, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и ликвидацию ее последствий (природоохранная деятельность).

Оценка воздействия на окружающую среду – вид деятельности по выявлению, анализу и учету прямых, косвенных и иных последствий воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности в целях принятия решения о возможности или невозможности ее осуществления.

Предельно допустимый выброс – норматив предельно допустимого выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух, который устанавливается для стационарного источника загрязнения атмосферного воздуха с учетом технических нормативов выбросов и фоновое загрязнение атмосферного воздуха при условии непревышения данным источником гигиенических и экологических нормативов качества атмосферного воздуха, предельно допустимых (критических) нагрузок на экологические системы, других экологических нормативов.

Природная среда (природа) – совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов.

Природные ресурсы – компоненты природной среды, природные объекты и природно-антропогенные объекты, которые используются или могут быть использованы при осуществлении хозяйственной и

иной деятельности в качестве источников энергии, продуктов производства и предметов потребления и имеют потребительскую ценность.

Природный комплекс – комплекс функционально и естественно связанных между собой природных объектов, объединенных географическими и иными соответствующими признаками.

Природный объект – естественная экологическая система, природный ландшафт и составляющие их элементы, сохранившие свои природные свойства.

Природно-антропогенный объект – природный объект, измененный в результате хозяйственной и иной деятельности, и (или) объект, созданный человеком, обладающий свойствами природного объекта и имеющий рекреационное и защитное значение.

Страхователь (полисодержатель) – субъект (объект), передающий риск.

Страховая выплата – денежная сумма (или их последовательность), выплачиваемая страховщиком страхователю при наступлении страхового случая или в соответствии с другими условиями страхового договора. В имущественном страховании называется страховым возмещением, в личном страховании – страховым обеспечением.

Страховая сумма – денежная сумма, на которую фактически застраховано имущество, жизнь, здоровье и т.д. и исходя из которой устанавливаются размеры страхового взноса (страховой премии) и страховой выплаты; сумма, объявляемая при заключении договора страхования, в пределах которой возможны страховые выплаты по компенсации убытков, нанесенных имущественным интересам страхователя, или сумма, которую страховщик обязуется выплатить по договору личного страхования. Если в страховом договоре оговорена полная компенсация ущерба, то страховая выплата совпадает со страховой суммой (при условии, что величина страховой суммы равна величине ущерба от наступления страхового случая).

Страховая оценка (в зарубежных работах - *страховая стоимость*) – термин, используемый в основном при страховании имущества и обозначающий оценку стоимости объекта страхования (которая может быть ниже действительной стоимости, но не должна превышать первоначальную, восстановительную стоимость).

Страховая франшиза – неоплачиваемая часть ущерба, примерно соответствующая затратам страховщика на определение суммы ущерба.

Страховое обеспечение – уровень страховой оценки по отношению к фактической стоимости имущества.

Страховой взнос (страховая премия) – денежная сумма (или их последовательность), безусловно выплачиваемая страхователем страховщику.

Страховой договор (соглашение, полис) – документ, фиксирующий сам факт и условия страхования, то есть права и обязанности страхователя и страховщика и т.д.

Страховой случай – неблагоприятное (связанное с потерями), в первую очередь с точки зрения страхователя, событие. Другое (эквивалентное) определение – фактически произошедшее событие, в связи с негативными или иными оговоренными последствиями которого может быть выплачено страховое возмещение или страховая сумма.

Страховой тариф (страховая ставка) – плата с единицы страховой суммы, на основании которой определяется страховой взнос.

Страховщик – субъект (объект), принимающий риск.

Технологический норматив – норматив допустимых выбросов и сбросов веществ и микроорганизмов, который устанавливается для стационарных, передвижных и иных источников, технологических процессов, оборудования и отражает допустимую массу выбросов и сбросов веществ и микроорганизмов в окружающую среду в расчете на единицу выпускаемой продукции.

Требования в области охраны окружающей среды (природоохранные требования) – предъявляемые к хозяйственной и иной деятельности обязательные условия, ограничения или их совокупность, установленные законами, иными нормативными правовыми актами, природоохранными нормативами, государственными стандартами и иными нормативными документами в области охраны окружающей среды.

Экологическая безопасность – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий.

Экологический аудит – независимая, комплексная, документированная оценка соблюдения субъектом хозяйственной и иной деятельности требований, в том числе нормативов и нормативных документов, в области охраны окружающей среды, требований международных стандартов и подготовка рекомендаций по улучшению такой деятельности.

Экологический риск – вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Обозначения:

- α – поощрение за единичный прирост уровня безопасности; показатель распределения Парето, показатель степени функции затрат предприятия;
- α_0 – удельные переменные издержки;
- A_{ij} – элемент матрицы свертки;
- b – доля компенсируемых центром затрат предприятия на природоохранные мероприятия, снижение уровня риска и т.д.;
- β – ставка «налога на прибыль», параметр механизма страхования;
- c – цена единицы продукции, производимой предприятием;
- \tilde{c} – стоимость проведения аудита;
- E – математическое ожидание;
- $f(\cdot)$ – целевая функция предприятия;
- $\Phi(\cdot)$ – целевая функция центра;
- F – суммарный выигрыш всех участников системы;
- $\varphi(\cdot)$ – функция затрат на повышение и поддержание уровня безопасности / снижение уровня риска;
- $\chi(\cdot)$ – функция штрафов;
- g – планируемый объем собственных средств предприятия, предназначенных для снижения уровня риска;
- \tilde{g} – прибыль страхователя;
- $G(\cdot)$ – функция агрегирования;
- γ – ставка «налога с дохода»; показатель степени функции затрат; параметр модели индикаторного поведения;
- $h(\cdot)$ – функция эффекта;
- $H(\cdot)$ – функция «дохода»;
- i, j, k – номер предприятия, риска и т.п. (используется в качестве нижнего индекса у соответствующей переменной);
- κ – страховой взнос;
- l – агрегированный результат деятельности;
- λ – ставка платы за загрязнение (или за уровень риска и т.д.);
- λ_0 – множитель Лагранжа;
- Λ – область компромисса;

μ – коэффициент функции штрафов;
 n – число предприятий, страхователей, рисков и т.п.;
 p – вероятность наступления страхового случая;
 p_0 – вероятность проведения аудита;
 π – страховой тариф;
 q – объем продукции, обеспечивающий предприятию минимальную себестоимость продукции;
 $Q = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество предприятий;
 Q' – множество победителей конкурса;
 Q_0 – суммарная плата за риск;
 r – параметр функции затрат (тип) предприятия; минимальная себестоимость;
 ρ – ставка налогообложения; норматив рентабельности;
 R' – интегральный риск;
 R – требуемое значение регионального уровня безопасности/риска;
 R_0 – общее количество ресурса;
 s, σ' – сообщение предприятия;
 $\sigma(\cdot)$ – функция стимулирования;
 θ_0 – коэффициент, характеризующий эффективность использования средств, направляемых на снижение уровня риска;
 u – объем производства;
 U – объем производства в регионе;
 v – объем средств, выделенных предприятием на природоохранные мероприятия;
 V – объем ресурсов (средств), выделяемых предприятию центром; страховое возмещение;
 w – коэффициент, характеризующий влияние объема выпуска продукции на уровень природно-техногенного риска;
 W – ущерб от чрезвычайной ситуации;
 x – нормативный уровень безопасности/риска предприятия;
 X – региональный уровень безопасности/риска;
 y – уровень безопасности/риска;
 $z(\cdot)$ – функция производственных затрат предприятия.

Сокращения:

- ВСВ – временно согласованный выброс;
- ИОР – интегральная оценка риска;
- КО – комплексная оценка;
- ЛПР – лицо, принимающее решения;
- МСУ – матричная структура управления;
- ПДВ(С) – предельно допустимый выброс (сброс);
- ПДД – предельно допустимая доза;
- ПДК – предельно допустимая концентрация;
- ПДУ – предельно допустимый уровень;
- ПХД – производственная, хозяйственная и иная деятельность;
- РУБ – региональный уровень безопасности;
- СУБ – система управления безопасностью;
- УБ – уровень безопасности;
- УР – уровень риска;
- ЧС – чрезвычайная ситуация;
- ЭкЭС – эколого-экономическая система.

ЛИТЕРАТУРА⁴¹

1 Абалкина И.Л. Страхование экологических рисков (из практики США). – М.: Инфра-М, 1998. – 88 с.

2 Авалиани С.Л., Голуб А.А., Струкова Е.Б., Шапошников Д.А. Основные положения методических рекомендаций по анализу эффективности мероприятий по охране атмосферного воздуха на основе расчета затрат на сокращение риска // Укрепление экологических фондов и система управления природоохранной деятельностью. – М.: Высшая школа, 1998. Часть 2. С. 32 – 80.

3 Автономов В.С. Модель человека в экономической науке. – СПб.: Экономическая школа, 1998. – 230 с.

4 Акимова Т.В., Хаскин В.В. Экономика природы и человека. – М.: Экономика, 2006. – 334 с.

5 Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Андреев О.П., Хабибуллин И.Л., Лобастова С.А. Эколого-экономическое управление охраной окружающей среды. – М.: УРСС, 2003. – 228 с.

6 * Андронникова Н.Г., Баркалов С.А., Бурков В.Н. Котенко А.М. Модели и методы оптимизации региональных программ развития. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 60 с.

7 * Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В. Комплексное оценивание в задачах регионального управления. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 54 с.

8 Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М. Комплексное оценивание: принцип бинарности и его приложения. – М.: ИПУ РАН, 1994. – 48 с.

9 Ансоф И. Стратегическое управление. – М.: Экономика, 1989. – 519 с.

10 Архипова Н.И., Кульба В.В. Управление в чрезвычайных ситуациях. – М.: РГГУ, 1998. – 316 с.

11 Атабиев А.Х. Экологическое страхование в обеспечении экологической безопасности региона. – М.: Институт проблем рынка РАН, 1998. – 33 с.

12 Багриновский К.А., Лемешев М.Я. О планировании экономического развития с учетом требований экологии // Экономика и математические методы. 1976. № 4. С. 681 – 691.

⁴¹ Работы, отмеченные звездочкой, можно найти в свободном доступе в электронной библиотеке на сайте теории управления организационными системами www.mtas.ru.

13 * Барабанов И.Н., Новиков Д.А. Механизмы управления риском в динамической модели эколого-экономической системы // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1994. № 10. С. 19 – 26.

14 Блачев Р.Н., Семенов И.Б. Оценка социально-экономических последствий чрезвычайных событий // Вопросы экономики. 1991. № 1. 1991. С. 59 – 63.

15 Боголюбов С.А. Экологическое право. – М.: Норма, 2001. – 397 с.

16 * Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с.

17 * Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления безопасностью. – М.: Синтег, 2001. – 160 с.

18 Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Еналеев А.К., Умрихина Е.В. Организационные механизмы управления научно-техническими программами. – М.: ИПУ РАН, 1993. – 64 с.

19 * Бурков В.Н., Грищенко А.Ф., Кулик О.С. Задачи оптимального управления промышленной безопасностью. – М.: ИПУ РАН, 2000. – 70 с.

20 * Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов. – М.: Наука, 1989. – 245 с.

21 * Бурков В.Н., Джавахадзе Г.С., Динова Н.И., Щепкин Д.А. Применение игрового имитационного моделирования для оценки эффективности экономических механизмов. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 51 с.

22 * Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Механизмы финансирования программ регионального развития. – М.: ИПУ РАН. 2002. – 54 с.

23 * Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Механизмы страхования в социально-экономических системах. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 109 с.

24 * Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2001. – 124 с.

25 Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Управление риском: механизмы взаимного и смешанного страхования // Автоматика и Телемеханика. 2001. № 10. С. 125 – 131.

26 *Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. – М.: Наука, 1981. – 384 с.

27 Бурков В.Н., Кондратьев В.В., Цыганов В.В., Черкашин А.М. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма. – М. Наука, 1984. – 272 с.

28 *Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. – М.: Синтег, 1997. – 188 с.

29 Бурков В.Н., Новиков Д.А. Страхование: оптимизация и перераспределение риска // Инвестиционный эксперт. 1997. № 5. С. 24 – 27.

30 Бурков В.Н., Щепкин А.В. Механизмы обеспечения безопасности: оценка эффективности // Вопросы экономики. 1991. № 1. С. 52 – 58.

31 Бурков В.Н., Щепкин А.В. Моделирование экономических механизмов обеспечения безопасности // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2000. № 6. С. 55 – 68.

32 *Бурков В.Н., Щепкин А.В. Экологическая безопасность. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 92 с.

33 Быков А.А. Оценка и сравнительный анализ риска для здоровья населения от загрязнения окружающей среды в городах России // Вопросы анализа риска. 1999. Т. 1. № 2-4. С. 28 – 79.

34 Васин А.А. Некооперативные игры в природе и обществе. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 412 с.

35 *Воронин А.А., Губко М.В., Мишин С.П., Новиков Д.А. Математические модели организаций. – М.: Ленанд, 2008. – 360 с.

36 Васильев С.Н., Лакеев А.В. Некоторые постановки задачи гармонизации интересов сторон / Труды Всероссийской школы «Проблемы анализа устойчивости развития и стратегической стабильности». – Иркутск: ИрВЦ РАН, 1995. Т. 3. С. 36 – 44.

37 Вахненко Д.В., Гарнизоненко Т.С., Колесников С.И. Биология с основами экологии. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 512 с.

38 *Выборнов Р.А. Модели и методы управления организационными системами с коррупционным поведением участников. – М.: ИПУ РАН, 2006. – 110 с.

39 *Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 327 с.

40 *Гилев С.Е., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Распределенные системы принятия решений в управлении региональным развитием. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 52 с.

41 Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л., Чепурных Н.В. Экология и экономика природопользования. 2-е изд. – М.: Единство, 2002. – 519 с.

42 Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. – М.: Наука, 1985. – 132 с.

43 *Глотова Н.П., Новиков Д.А. Модели и механизмы управления образовательными сетями и комплексами. – М.: Институт управления образованием РАО, 2004. – 142 с.

44 Глухов В.В., Некрасова Т.П. Экономические основы экологии. – СПб.: Питер, 2003. – 384 с.

45 Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.

46 Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. – М.: Радио и связь, 1982. – 144 с.

47 Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Сурков Ф.А. Модели управления эколого-экономическими системами. – М.: Наука, 1984. – 120 с.

48 Горстко А.Б., Угольницкий Г.А. Введение в моделирование эколого-экономических систем. – Ростов на Дону: Изд-во РГУ, 1990. – 112 с.

49 *Губко Г.В. Модели и механизмы управления особо охраняемыми природными территориями. – Миасс: Геотур, 2002. – 88 с.

50 *Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.

51 *Губко М.В. Управление организационными системами с коалиционным взаимодействием участников. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 140 с.

52 *Данилов В.И. Лекции по теории игр. – М.: Российская экономическая школа, 2002. – 140 с.

53 Данилов-Данильян В.И., Лосев А.В. Экологический вызов и устойчивое развитие. – М.: Прогресс-Традиция, 2000. – 415 с.

54 Емельянов С.В., Бурков В.Н., Щепкин А.В. и др. Метод деловых игр. – М.: Международный центр научно-технической информации, 1976. – 48 с.

55 Зинченко В.И., Павлов М.Л., Хлычиев А.И., Щепкин А.В. Построение комплексной оценки уровня экологической безопасности региона // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях 2003. № 3. С. 88 – 97.

56 Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.

57 *Караваяев А.П. Модели и методы управления составом активных систем. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 151 с.

58 Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30 декабря 2001 г. № 195-ФЗ (с изменениями). Глава 8.

59 Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. – М.: Прогресс, 1979. – 504 с.

60 Кондратьев В.Д., Толстых А.В., Уандыков Б.К., Щепкин А.В. Оценка уровня риска функционирования потенциально опасных объектов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2004. № 2. С. 57 – 65

61 *Кондратьев В.Д., Щепкин А.В. Комплексное оценивание в области безопасности дорожного движения. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 54 с.

62 Коптюг В.А., Матросов В.М., Левашов В.К., Демянко Ю.Г. Устойчивое развитие цивилизации и место в ней России: проблемы формирования национальной стратегии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996.

63 Коровкин П.П. Неравенства. – М.: Наука, 1983. – 71 с.

64 Кох Р. Принцип 80/20. – Минск: Попурри, 2004. – 352 с.

65 Кузьмицкий А.А., Новиков Д.А. Организационные механизмы управления развитием приоритетных направлений науки и техники. – М.: ИПУ РАН, 1993. – 67 с.

66 Кукушкин Н.С., Морозов В.В. Теория неантагонистических игр. – М.: МГУ, 1984. – 104 с.

67 Лапко А.В., Цугленок Н.В., Цугленок Г.И. Имитационные модели пространственно распределенных экологических систем. – Новосибирск: Наука, 1999. – 190 с.

68 Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б., Павельев В.В., Пашенко Ф.Ф. Комплексное оценивание и планирование развития региона. – М.: ИПУ РАН, 2006. – 52 с.

69 Лемешев М. Эколого-экономическая модель природопользования // Всесторонний анализ окружающей природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 266 – 276.

70 Лесных В.В., Шангареева Е.Ю., Владимирова Е.П. и др. Экологическое страхование в газовой промышленности: информационные, методические и модельные аспекты. – М.: Наука, 1996. – 138 с.

71 Лукьянчиков Н.Н, Потравной И.М. Экономика и организация природопользования. – М.: Тройка, 2000. – 456 с.

72 Малишевский А.В. Качественные модели в теории сложных систем. – М.: Наука, 1998. – 528 с.

73 Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М. Наука, 1982. – 320 с.

74 Математические модели в экологии / Сборник трудов. – Горький: ГГУ, 1980. – 167 с.

75 Математическое моделирование в экологии / Сборник трудов. – М.: Наука, 1978. – 180 с.

76 Математическое моделирование экологических свойств популяций / Сборник трудов. – Владивосток: ИАПУ ДНЦ РАН, 1980. – 144 с.

77 Методические рекомендации по администрированию платы за негативное воздействие на окружающую среду в части выбросов в атмосферный воздух / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (РД-19-02-2007 от 12.09.07).

78 Модели экосистем и методы определения их параметров / Сборник трудов. – Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1981. – 146 с.

79 Моделирование и управление процессами регионального развития / Под ред. С.Н. Васильева. – М.: Физматлит, 2001. – 432 с.

80 Моделирование процессов в природно-экологических системах / Под ред. В.И. Гурмана, А.И. Москаленко. – Новосибирск: Наука, 1982. – 178 с.

81 Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / Под ред. В.И. Гурмана, Е.В. Рюминой. – М.: Наука, 2003. – 175 с.

82 Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

83 Моисеев Н.Н. Расставание с простотой. – М.: Аграф, 1998. – 480 с.

84 Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь Разума. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. – 228 с.

85 Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. – М.: Наука, 1985. – 272 с.

86 Моисеев Н.Н. Экология и образование. – М.: ЮНИСАМ, 1996. – 192 с.

87 Морозов А. Аварийные игры // Техпропаганда. 1933. № 7.

88 Моткин Г.А. Основы экологического страхования. – М.: Наука, 1996. – 191 с.

89 Никитин А.Т., Степанов С.А. Государственное и муниципальное управление в сфере охраны окружающей среды. – М.: МНЭПУ, 2001. – 232 с.

90 Новая парадигма развития России в XXI веке. Комплексные исследования проблем устойчивого развития: идеи и результаты / Под редакцией В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашова. – М.: Academia, 2000. – 397 с.

91 Новик И.Б. Проблемы оптимизации в экологии. 1978. – М.: Природа. – 328 с.

92 *Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. – М.: ЛЕНАНД, 2006. – 332 с.

93 *Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 184 с.

94 Новиков Д.А. Механизмы страхования: перераспределение риска и манипулирование информацией // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. № 5. С. 44 – 55.

95 Новиков Д.А. Оптимальные механизмы стимулирования в системах управления экологической безопасностью // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1994. № 8. С. 51 – 58.

96 Новиков Д.А. Оптимальные функции штрафов в системах управления экологической безопасностью / Труды II Международной конференции «Проблемы управления в чрезвычайных ситуациях». – М.: ИПУ РАН, 1994. С. 53 – 55.

97 *Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (математические модели). – М.: ИПУ РАН, 1998. – 216 с.

98 *Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 2-е изд. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.

99 *Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы функционирования организационных систем с распределенным контролем. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 118 с.

100 *Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. – М.: Синтег, 2003. – 160 с.

101 Новиков Д.А. Экономические механизмы управления риском в многоэлементных системах / Труды III Международной конференции «Проблемы управления в чрезвычайных ситуациях». – М.: ИПУ РАН, 1995. С. 37 – 38.

102 Новиков Д.А. Эколого-экономический мониторинг: затраты и достоверность информации / Труды IV Международной конференции «Проблемы управления в чрезвычайных ситуациях». – М.: ИПУ РАН, 1997. С. 83 – 84.

103 Новиков Д.А. Экономические механизмы управления риском в организационно-технических системах / Труды 5-й Международной научно-практической конференции «Опыт разработки и применения САПР», Львов: ЛГТУ, 1999. С. 44 – 48.

104 Новиков Д.А. Экономические механизмы экологического мониторинга // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1996. № 12. С. 23 – 29.

105 Определение Конституционного суда Российской Федерации от 10 декабря 2002 г. № 284-О*.

106 Опойцев В.И. Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. – М.: Наука, 1977. – 248 с.

107 Оптимальное управление природно-экономическими системами / Под ред. В.И. Гурмана, А.И. Москаленко. – М.: Наука, 1980. – 296 с.

108 Островский С. Аварийные игры на Шатуре // Техпропаганда. 1933. № 7.

109 *Петросян Л.А., Захаров В.В. Введение в математическую экологию. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. – 224 с.

110 Петросян Л.А., Захаров В.В. Математические модели в экологии. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. – 254 с.

111 Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. – М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.

112 Плотинский Ю.М. Теоретические и эмпирические модели социальных процессов. – М.: Логос, 1998. – 280 с.

113 *Половинкина А.И., Толстых А.В., Уандыков Б.К. Щепкин А.В. Игровое моделирование экономических механизмов обеспечения безопасности. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 72 с.

114 Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытгов И.А. Динамические модели экологических систем. – Л.: Наука, 1980. – 289 с.

115 Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ. – М.: Наука, 1985. – 424 с.

116 Постановление Правительства Москвы от 19 ноября 2002 года № 939-ПП «Положение о Департаменте природопользования и охраны окружающей среды города Москвы».

117 Постановление Правительства Российской Федерации от 28 августа 1992 г. № 632 «Об утверждении порядка определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия» с изменениями, внесенными решением Верховного Суда РФ от 12.02.2003 № ГКПИ 03-49.

118 Постановление Правительства Российской Федерации от 12 июня 2003 г. № 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления» (с изменениями).

119 Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

120 Потапов А.Д. Экология. – М.: Высшая школа, 2004. – 528 с.

121 Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками / Под редакцией Рагозина А.Л. – М.: КРУК, 2003. – 316 с.

122 Рагозин А.Л. Оценка и картографирование опасности и риска от природных и техногенных процессов (история, методология, методика и примеры) // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. № 3. С. 16 – 41. №. 5. С. 4 – 21.

123 Распоряжение Правительства РФ от 31.08.2002 № 1225-р «Об экологической доктрине Российской Федерации».

124 Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. – М.: Наука, 1986. – 496 с.

125 Рюмина Е.В. Анализ эколого-экономических взаимодействий. – М.: Наука, 2000. – 158 с.

126 Самарский А.А., Моисеев Н.Н., Петров А.А. Математическое моделирование. Процессы в сложных экономических и экологических системах. – М.: МГУ, 1986. – 296 с.

127 Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

128 Советский энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988.

129 Степановских А.С. Прикладная экология. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 751 с.

130 Тимофеева С.С. Экологический менеджмент. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 352 с.

131 Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Прималенный А.А. Управление эколого-экономическими системами. – Севастополь: Гидрофизика, 1999. – 180 с.

132 Толстых А.В., Уандыков Б.К., Щепкин А.В. Моделирование экономических механизмов обеспечения безопасности при техногенных и природных катастрофах // Автоматика и телемеханика. 2004. № 5. С. 142 – 153.

133 Уатт К. Экология и управление природными ресурсами. Количественный подход: – М.: Мир, 1971. – 464 с.

134 Уголовный кодекс РФ от 13 июня 1996 г. № 63-ФЗ (с изменениями). Глава 26.

135* Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Иерархические системы ромбовидной структуры для управления качеством речных вод // Управление большими системами. 2007. Выпуск 19. С. 187 – 203.

136* Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Информационно-аналитическая система управления эколого-экономическими объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. № 6. С. 230 – 237.

137* Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Математическая формализация методов иерархического управления эколого-экономическими системами // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 64 – 69.

138* Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Методы иерархического управления качеством речной воды // Водные ресурсы. 2003. Том 31. № 2. С. 1 – 8.

139 Угольницкий Г.А. Теоретико-игровые принципы оптимальности иерархического управления устойчивым развитием // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С. 72 – 78.

140 Угольницкий Г.А. Управление эколого-экономическими системами. – М.: Вузовская книга, 2004. – 132 с.

141 Указ Президента РФ от 04.02.1994 № 236 «О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития».

142 Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию».

143 Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. – 431 с.

144 Урсул А.Д., Вашекин Н.П., Дзлиев М.И. и др. Безопасность России: Словарь терминов и определений. – М.: МГФ «Знание», 1998. – 206 с.

145 Усов А.Б. Методы управления эколого-экономическими системами // Экономика и управление. 2007. № 2. С. 88 – 90.

146 Фатхутдинов Р., Сивкова Л. Принуждение, побуждение, убеждение: новый подход к управлению // Управление персоналом. 1999. № 2. С. 32 – 40.

147 Федеральный закон «О безопасности» (в ред. Закона РФ от 25.12.1992 № 4235-1, Указа Президента РФ от 24.12.1993 № 2288, Федеральных законов от 25.07.2002 № 116-ФЗ, от 07.03.2005 № 15-ФЗ, от 25.07.2006 № 128-ФЗ, от 02.03.2007 № 24-ФЗ).

148 Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (в ред. Федеральных законов от 28.10.2002 № 129-ФЗ, от 22.08.2004 № 122-ФЗ, от 04.12.2006 № 206-ФЗ, от 18.12.2006 № 232-ФЗ).

149 Федеральный закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (с изменениями от 22 августа 2004 г., 9 мая 2005 г.).

150 Федеральный закон от 21 июля 1997г. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (в ред. Федеральных законов от 07.08.2000 № 122-ФЗ, от 10.01.2003 № 15-ФЗ, от 22.08.2004 № 122-ФЗ, от 09.05.2005 № 45-ФЗ).

151 Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями от 22 августа, 29 декабря 2004 г., 9 мая, 31 декабря 2005 г., 18 декабря 2006 г., 5 февраля, 26 июня 2007 г.).

152 Форрестер Д. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978. – 168 с.

153 Фролов К.В., Махутов Н.А. Проблемы безопасности сложных технических систем / Сборник избранных статей и докладов 2-ой международной конференции «Безопасность и экология горных территорий». Владикавказ, 1995. С. 12 – 18.

154 *Харитонов В.А., Белых А.А. Технологии современного менеджмента. – Пермь: ПГТУ, 2007. – 190 с.

155 *Харитонов В.А., Винокур И.Р., Белых А.А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свертки // Управление большими системами. 2007. Выпуск 18. С.129 – 140.

156 Чепрунова О.Ю., Щепкин А.В. Разработка экспериментов с моделями организационных систем // Автоматика и телемеханика. 1988. № 8. С. 87 – 93.

157* Щепкин А.В. Внутрифирменное управление (модели и механизмы). – М.: ИПУ РАН, 2001. – 80 с.

158* Щепкин А.В. Моделирование механизма снижения уровня риска на предприятии // Управление большими системами. 2004. № 9. С. 214 – 219.

159* Щепкин Д.А. Штрафы при управлении уровнем риска на предприятии // Управление большими системами. 2004. № 9. С. 220 – 231.

160 Щуров Б.В., Губанов Л.Н., Зверева В.И. Управление природопользованием. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2007 – 214 с.

161 Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент / Под ред. В.И. Гурмана, Л.Ю. Дамешек. – Новосибирск: Наука, 1987. – 216 с.

162 Юдкевич М.М., Подколзина Е.А., Рябина А.Ю. Основы теории контрактов: модели и задачи. – М.: ГУ ВШЭ, 2002. – 352 с.

163 Beard R. et al. Risk theory. The stochastic basis of insurance. Third edition. London, 1984. – 384 p.

164 Bolton P., Dewatripont M. Contract Theory. – Massachusetts: MIT Press, 2005. – 688 p.

165 Carley M., Christie I. Managing Sustainable Development. – Minneapolis, 1993. – 304 p.

166 Guidelines for Ecological Risk Assessment / Risk Assessment Forum U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1998.

167 Hanley N., Folmer H. Game Theory and the Environment. – London: Edward Elgar Pub, 1999. – 432 p.

168 Hofbauer J., Sigmund K. Evolutionary Games and Population Dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 351 p.

169 Knight F. Risk, Uncertainty and Profit. – Boston: Houghton Mifflin, 1921. – 447 p.

170 Kolluru R., Bartell S., Pitblado R., Stricoff S. Risk assessment and management handbook. For environmental health and safety professionals. – New York: McGraw-Hill, 1996. – 324 p.

171 Levy M. Market efficiency, the Pareto wealth distribution and the Levy distribution of stock returns. – Jerusalem: Hebrew University, 2001. – 52 p.

172 Mas-Colell A., Whinston M.D., Green J.R. Microeconomic theory. – N.Y.: Oxford Univ. Press, 1995. – 981 p.

- 173** Meadows D.H., Randers F., Behrens W.W. The limits to growth. – N.Y.: Universe Book, 1972. – 205 p.
- 174** Myerson R.B. Game theory: analysis of conflict. – London: Harvard Univ. Press, 1991. – 568 p.
- 175** Novikov D.A. Management of active systems: stability or efficiency // Systems Science. 2001. Vol. 26. № 2. P. 85 – 93.
- 176** Pareto V. Manuele d'Economia Politica. 1906.
- 177** Pratt J. Risk aversion in the small and in the large // Econometrica. 1964. V. 52. №. 1. P. 122 – 136.
- 178** Riceiardi F.M. et al. Top Management Decision Simulation: the AMA Approach. – N.Y.: American Management Association, 1957. – 132 p.
- 179** Risk, Analysis, Assessment and Management / Edited by Jake Ansell and Frank Wharton. – N.Y.: J. Wiley & Sons Ltd., 1992. – 482 p.
- 180** Rohn Y. Fuhrungsentscheidungen in Unternehmensplanspiel. Essen, 1964. – 264 p.
- 181** Siebert H. Economics of the environment: theory and policy. – Berlin: Springer, 1992. – 295 p.
- 182** Vassilyev S.N., Baturin V.A., Lakeyev A.V. Ecologo-economic model and solvability of harmonization problem / Proceedings of IEEE International Conference on Systems. – Lille: Man and Cybernetics, 1993. V. 5. P. 339 – 343.
- 183** Zipf G. Human behavior and the principle of least effort. – Cambridge: Addison-Westley, 1949. – 573 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**БУРКОВ
ВЛАДИМИР
НИКОЛАЕВИЧ**

1939 г.р., доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией активных систем Института проблем управления Российской академии наук, действительный член РАЕН, лауреат государственной премии СССР и премии Дж. Фон-Неймана. Более 30 лет работает в области управления большими системами. Вице-президент Российской ассоциации по управлению проектами, основатель теории активных систем, один из ведущих специалистов по управлению социально-экономическими системами.

E-mail: vlab17@bk.ru.



**НОВИКОВ
ДМИТРИЙ
АЛЕКСАНДРОВИЧ**

1970 г.р., доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института проблем управления Российской академии наук, профессор Московского физико-технического института.

Автор более 300 научных работ по теории управления социально-экономическими системами, в том числе – по системному анализу, теории игр, принятию решений, управлению проектами и механизмам управления организационными системами.

E-mail: novikov@ipu.ru.



**ЩЕПКИН
АЛЕКСАНДР
ВАСИЛЬЕВИЧ**

1949 г.р., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления Российской академии наук, профессор Московского физико-технического института.

Автор более 100 научных работ по управлению социально-экономическими системами, игровому имитационному моделированию, экономическим механизмам обеспечения безопасности при природных и техногенных катастрофах.

E-mail: sch@ipu.ru.

Научное издание

*Бурков Владимир Николаевич
Новиков Дмитрий Александрович
Щепкин Александр Васильевич*

**МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ**

Под редакцией академика С.Н. Васильева

ИД № 01389 от 30.03.2000
Гигиенический сертификат № 77.99.10.953.Д.005466.07.03
от 25.07.2003

Подписано в печать 04.02.02. Формат 60×90/16.
Усл. печ.л. 15,25. Тираж 1000 экз.

Издательство физико-математической литературы (ФИЗМАТЛИТ)
123182, Москва, ул. Щукинская, д.12, к. 1