

КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И МЕХАНИЗМ ФИНАНСИРОВАНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Ю. Вега*, А. К. Еналеев**

*Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва,

**Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

*✉ Vega.AY@rea.ru, **✉ anverena@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены некоторые аспекты планирования и управления адаптационными мероприятиями, направленными на снижение последствий негативных изменений климата на инфраструктурные объекты экономики. Проведен анализ проблем оценки риска неблагоприятного воздействия изменения климата на объекты в условиях значительной неопределенности. Рассмотрена структура комплексного оценивания объектов с использованием карт прогнозов климата и оценок уязвимости объектов. Предложен подход к формированию портфеля инфраструктурных объектов. Отбор объектов предложено проводить в два этапа. На первом этапе для формирования предварительного портфеля объектов применяется метод комплексного оценивания. На втором этапе предложено применять метод, основанный на последовательном выделении инвестиционного ресурса в порядке убывания оценки удельного риска. При реализации второго этапа ограниченность инвестиционного фонда определяет окончательный портфель объектов для проведения адаптационных мероприятий. Представлена модель организационного механизма финансирования и стимулирования проведения адаптационных мероприятий на объекте при неполной информированности управляющего органа. Предложен механизм стимулирования адаптационных работ, обеспечивающий сообщение управляющему органу достоверной информации от объектов. Показано, что предложенный механизм является оптимальным в условиях неполной информированности управляющего органа.

Ключевые слова: изменения климата, адаптационные мероприятия, комплексная оценка риска, отбор инфраструктурных объектов, размещение инвестиционного фонда, затраты, механизм финансирования, стимулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка проектов создания значимых инфраструктурных объектов (ИО), например объектов промышленной, энергетической, транспортной инфраструктуры, с длительными сроками строительства и эксплуатации, требует анализа и прогноза их жизненных циклов. Прогноз жизненного цикла от начала строительства до окончания функционирования рассматриваемого объекта включает прогноз внешних воздействий на объект еще на этапе проектирования. Одним из важнейших факторов внешнего воздействия является влия-

ние на ход строительства и функционирования объекта изменений климата (ИК). Следовательно, при проектировании строительства и в процессе функционирования объектов необходимо заранее предусмотреть адаптационные меры по отношению к прогнозируемым негативным воздействиям ИК.

Исходной базой для планирования и проведения адаптационных мероприятий являются прогнозы ИК. Результаты прогноза климатических изменений на перспективу до 2050–2059 гг. и 2090–2099 гг. на территории РФ и их влияния на природную среду и хозяйственные объекты пред-



ставлены в докладе [1]. В докладе [2] даются описание происходящих и ожидаемых ИК, воздействия ИК на природную среду, население и экономику РФ и последствия ИК, а также основные направления адаптации к ним.

В докладе Росгидромета [3] изложены результаты исследований и разработок в области научно-методического обоснования отраслевых и региональных стратегий адаптации к текущим и ожидаемым ИК. В этом докладе проводится системный анализ проблемы адаптации экономики к ИК, рассматриваются основные понятия, цели и задачи адаптации, обозначаются пути и сложности достижения этих целей.

Основополагающим документом в рассматриваемой области является стандарт «Адаптация к изменениям климата» [4]. Он определяет области применения, термины и определения, общие принципы адаптации ИО к ИК, включая требования к организации планирования и реализации процессов адаптации. В документе приведены ссылки на международные стандарты и публикации, на основе которых он сформирован.

В статье [5] дан анализ вызовов и окон возможностей в области адаптации к ИК, отмечена необходимость развития системы климатического страхования. Обзор отечественных публикаций по описанию рисков ИК и их влиянию на устойчивое развитие социально-экономической сферы страны представлен в публикации [6].

В отраслевом разрезе проблема адаптации к ИК рассмотрена в следующих публикациях. В статье [7] изложены проблемы, связанные с влиянием ИК на объекты нефтегазовой отрасли, обсуждаются подходы к созданию системы управления рисками и адаптации к ИК. В работе [8] приведен анализ увеличения затрат на устранение экологических последствий при отсутствии надлежащих предупредительных мер. В публикации [9] рассматриваются варианты воздействия климатических факторов на объекты строительства, наземного транспорта и топливно-энергетического комплекса, описываются направления применения адаптационных мероприятий. Утверждается, что ИК приводят не только к рискам, но и к новым возможностям, особенно с развитием альтернативной энергетики [10]. В докладе [11] обсуждаются вопросы оценки риска, кредитования и страхования при строительстве объектов с учетом адаптационных мероприятий.

Проблемы оценки риска ИК, планирования и реализации адаптационных мер обсуждаются в обширном количестве зарубежных публикаций. Классификация исследований по этим проблемам

и основные результаты представлены в нескольких обзорах. Наиболее полно освещают эту проблематику статьи [12–14], посвященные рассмотрению железнодорожной отрасли. Эти обзоры содержат ссылки на основные публикации по рассматриваемой тематике. Следует отметить, что проблемы по адаптации железнодорожной инфраструктуры к ИК свойственны и инфраструктуре других отраслей экономики. Поэтому ограничимся здесь ссылками на эти обзоры.

Обзор проблем, возникающих при оценке последствий негативного влияния и возможностей проведения адаптационных мероприятий для объектов железнодорожной инфраструктуры, представлен в работе [12]. Здесь рассмотрена связь влияния различных климатических факторов и их возможных воздействий на объекты инфраструктуры, даны примеры конкретных мер по адаптации и представлен анализ проблем при оценке рисков ИК для железнодорожной инфраструктуры. В статье [13] описаны особенности эксплуатации и строительные меры по обеспечению климатически устойчивой железнодорожной инфраструктуры. В публикации [14] рассматриваются требования к стратегии адаптационных мер к ИК для железнодорожного транспорта.

В Великобритании по заказу основных заинтересованных представителей железнодорожного транспорта был составлен отчет «Завтрашняя железная дорога и адаптация к изменению климата» (TRaCCA) [15], в котором отражено: нынешнее понимание погодных опасностей на железных дорогах; то, как они могут измениться в будущем; текущие меры по обеспечению устойчивости и адаптации к ИК; возможности для дальнейших действий по обеспечению устойчивости и адаптации; требования к дальнейшим структурам и инструментам для поддержки экономически эффективных действий.

Системная основа для национальной оценки климатических рисков для инфраструктуры в разрезе различных стран дана в работе [16].

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что ИО взаимозависимы и требуют комплексного реагирования на климатические воздействия. Для понимания выгод от адаптации необходима информация об исходных условиях и адекватная оценка риска. Отмечается [12], что традиционные методы оценки риска не применимы в условиях глубокой неопределенности условий и неточности климатических прогнозов на длительную перспективу. Отмеченные неопределенности приводят к тому, что при оценке характеристик риска климатических опасностей и воздействий на

объекты используются ранговые показатели потенциального риска, которые могут принимать, например такие значения, как «низкий», «умеренный», «высокий», «очень высокий» [7, 17].

В настоящей статье проводится анализ проблем оценки риска в условиях неопределенности и возможных подходов к их решению. Недостаточно исследованным остается вопрос об оценке риска, когда на объект действуют одновременно несколько видов опасностей. В статье предлагается применять методологию комплексного оценивания для оценки влияния нескольких опасностей и учета степени их воздействия на разные ИО и на ее основе формировать из большого количества ИО портфель наиболее важных объектов для осуществления адаптационных мероприятий. Описание общих принципов и примеры применения методологии комплексного оценивания для оценки альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте дано в статье [18].

В стандарте [4] обозначено требование обеспечения достоверных исходных данных для планирования адаптационных мероприятий. Более точные и достоверные данные, как правило, сосредоточены у персонала объектов, для которых необходимо планировать инвестиции и объемы работ по реализации адаптационных мероприятий. Запросы этих данных со стороны планирующих органов могут приводить к намеренному искажению сообщаемых данных из-за стремления ИО получить больший размер средств. В статье предложен механизм стимулирования адаптационных работ, побуждающий сообщение в планирующий орган достоверных данных от персонала ИО.

1. ПРОБЛЕМЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПОДХОДЫ ПО АДАПТАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

При строительстве и функционировании ИО принятие решений по адаптации к ИК основывается на прогнозах ИК и оценках риска их негативно-го влияния. Исходя из классического описания риска применительно к ИК [12], под риском негативного влияния ИК обычно понимают произведение вероятности проявления опасностей ИК на величину ожидаемого ущерба, наносимого этими опасностями. Однако, как обосновывается в работах [12, 16] и др. (ссылки на них указаны в обзоре [12]), использование определения риска в классическом понимании встречает трудности и допустимо при весьма ограниченных предположениях.

Поскольку реализация адаптационных решений зачастую требует значительных инвестиций и рассчитана на длительную перспективу, требуются долгосрочные прогнозы ИК. Последние, однако, не обладают приемлемой точностью и надежностью.

Изменения климата порождают следующую цепочку факторов, влияющих на ИО: «факторы ИК – опасности – воздействия – уязвимости – последствия» (рис. 1). Каждый из этих факторов может иметь разную интенсивность и описывается условной вероятностью проявления в зависимости от предыдущих факторов в рассматриваемой цепочке. К сожалению, значения параметров интен-

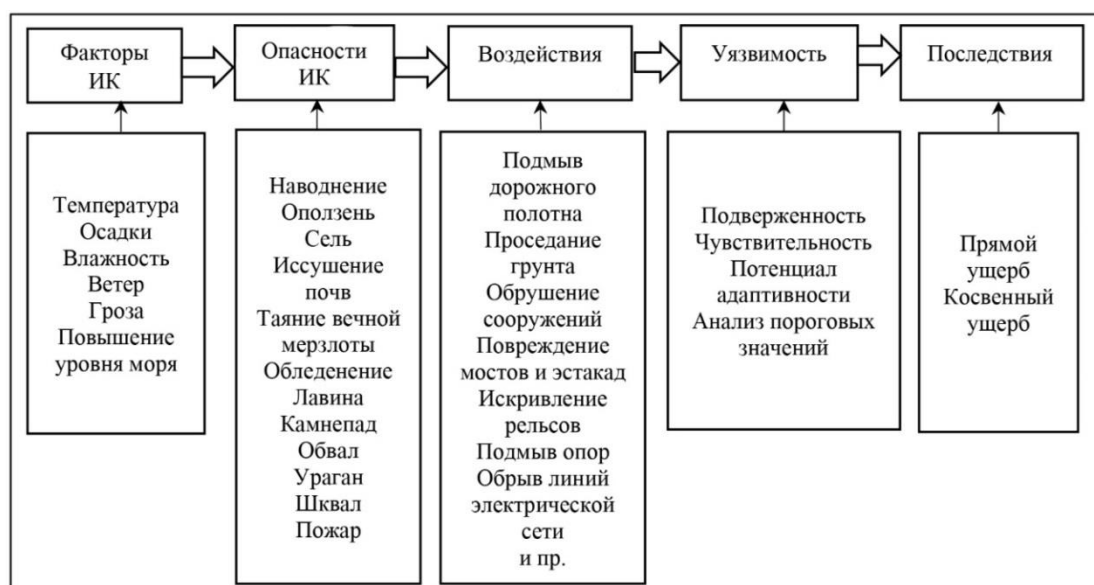


Рис. 1. Факторы негативного влияния ИК при оценке риска ИО



сивностей и вероятности проявления этих факторов сложно оценить в силу отсутствия достаточно полной статистики метеорологического, гидрологического, климатического мониторинга и, главное, существенной неопределенности долгосрочных прогнозов. Кроме того, взаимосвязь факторов носит неопределенный и неустойчивый характер.

Влияние указанных факторов на ИО зависит от вида объектов, их стоимости и сроков службы, используемых стандартов проектирования и строительства. Инфраструктурные объекты имеют разную степень уязвимости в зависимости от их конструктивных особенностей, географического расположения и сроков эксплуатации.

Неопределенность прогнозов ИК и сценариев реализации указанной цепочки факторов порождает ряд принципиальных проблем при построении плана мероприятий по адаптации к неблагоприятному влиянию ИК.

Первая проблема заключается в неопределенности интенсивности и отсутствия надежных оценок вероятностей проявления опасностей в разных регионах и на территориях расположения объектов. Возникает необходимость учитывать географическое распределение факторов на территории страны с учетом ландшафта и природно-климатических особенностей ее регионов.

Вторая проблема заключается в следующем. Предположим, что определены вероятность и интенсивность опасностей ИК. Требуется оценить степень и вероятность воздействия на ИО в рассматриваемом регионе при возникновении каждого вида опасности. Дело в том, что проявление опасности не всегда приводит к воздействию на рассматриваемые объекты в силу их защищенного расположения на местности. Или, наоборот, небольшое проявление опасности может оказать сильное воздействие (например, даже при умеренном дожде расположение объекта в низменной местности или в пойме реки может приводить к подтоплениям).

Третья проблема связана с оценкой уязвимости ИО. Для формирования достоверной оценки уязвимости объекта при осуществлении разного вида воздействий и возникновении опасностей ИК необходимо проводить исследования и диагностику объекта в полевых условиях. В большинстве случаев это дорогостоящая и длительная процедура. Для вновь строящихся или проектируемых объектов оценку уязвимости необходимо проводить еще на стадии разработки проекта строительства.

Например, для железнодорожной отрасли помимо климатического прогноза необходимо учитывать эволюцию железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, переход на альтернативные виды топлива, изменение спроса на перевозки, увеличение нагрузки на железнодорожное полотно с увеличением объема перевозок, влияние высокоскоростного движения и др.

Четвертая проблема относится к оценке последствий от воздействия опасностей ИК на ИО. В зависимости от интенсивности воздействий и уязвимости объекта последствия могут включать:

- прямой ущерб, который определяется непосредственно потерей полезных свойств объекта и затратами на его восстановление;
- косвенный ущерб, определяемый системными потерями от прекращения или ограничения функционирования объекта, т. е. влиянием на функционирование связанных с ним объектов и систем.

Существуют три основных составляющих экономических издержек инфраструктуры, связанных с изменением климата:

- стоимость ущерба от прямого воздействия на ИО, которая привела к разрушению объекта и нарушению его функций;
- стоимость потерь потребителей услуг, связанных с нарушением функций объекта;
- стоимость адаптационных мероприятий.

Оценка степени зависимости таких последствий от прогнозируемых природных воздействий затруднена. Разрушение объектов, таких, например, как мосты, приводит к долгосрочному выводу их из строя и высоким затратам на восстановление. Необходимо учитывать критичность отказа некоторых ИО, который может носить системный характер и оказывать существенное влияние на функционирование государства, экономики, жизнь и здоровье населения. При этом важно понимание системных проектов и действий, оказывающих влияние на зависимости внутри и вне региона. Что касается дорожной инфраструктуры, следует учитывать также наличие или отсутствие обходных путей движения транспорта при разрушении дороги.

Следует отметить, что существует еще зависимость между различными видами опасностей, имеющая нелинейный характер. Совместное действие двух и более опасностей может создавать кумулятивный эффект, последствия которого трудно предсказуемы.

Перечисленные проблемы в оценке риска указывают на сложность планирования адаптационных решений.

При реализации проектов и мероприятий по адаптации ИО к ИК существенны ограничения инвестиций. Так как количество ИО, подверженных воздействию ИК, измеряется сотнями, если не тысячами, то необходимо определить перечень первоочередных объектов и уровень реализации адаптационных мероприятий.

Отмеченные неопределенности и ограничения практически приводят к невозможности оперативного получения надежных оценок риска и, следовательно, к невозможности принятия наилучших решений в условиях неполноты информации. В этих условиях приходится искать «ограниченно рациональные» решения, которые приближенно, но достаточно адекватно и эффективно, могут служить заменой оптимальным адаптационным решениям для идеального случая, когда имеются точные прогнозы ИК и полная информация о степени воздействия, уязвимости и ущербе для рассматриваемых объектов.

Сложность проблемы точной оценки риска в условиях ненадежных климатических прогнозов и неполной информированности о степени воздействия ИК и уязвимости объектов заставляет искать решения путем разбиения этой проблемы на ряд задач:

- определить регионы, подверженные наиболее опасным факторам ИК;
- сформировать список наиболее уязвимых ИО в этих регионах;
- описать сценарии ИК в местах расположения этих ИО;
- оценить степень воздействия ИК на ИО для рассматриваемых сценариев, включая величину ущерба (прямого и косвенного), с учетом стоимости восстановления или строительства объекта;
- оценить потребность в инвестициях на адаптационные мероприятия, отобрать ИО, на которых возможно максимальное снижение риска от ИК;
- организовать сбор уточненной информации с мест о степени воздействия ИК и уязвимости ИО и обеспечить достоверность и неманипулируемость информации;
- разработать проекты и планы реализации адаптационных мероприятий.

Для решения перечисленных задач требуется провести комплексные разработки, включающие организационные, исследовательские и проектные мероприятия. Для успешной реализации этих мероприятий может оказаться полезным использование методологии организационного управления [19, 20].

В настоящей статье рассмотрим три разрабатываемых в статье в рамках этой методологии и применимых при решении перечисленных выше задач метода:

- определения списка ИО для применения первоочередных адаптационных мероприятий;
- распределения инвестиций между ИО и финансирования адаптационных мероприятий в зависимости от объемов выполняемых работ;
- обеспечения неманипулируемости информации, получаемой от управленческого персонала объектов.

Далее предлагается применять метод комплексного оценивания для определения объектов с наибольшим риском, основанный на использовании ранговых показателей [7, 17, 18] и применимый в условиях неполноты и неточности исходных данных.

На рис. 2 представлена схема, описывающая порядок выполнения действий в предлагаемой технологии отбора ИО, инвестирования, планирования и стимулирования адаптационных мероприятий, а также место рассматриваемых в статье методов в этой технологии. Блоки с номерами 1–4 представляют предварительный отбор ИО с применением метода комплексного оценивания. Этот метод описан в § 2. Блоки 5 и 6 обозначают выполнение работ по начальному обследованию ИО из предварительно сформированного портфеля при реализации блоков 1–4. Описание этих работ выходит за рамки данной статьи, поскольку специфично для каждого ИО и требует анализа его особенностей. Результатом этого обследования являются приближенные численные оценки риска и потребностей в инвестициях на адаптационные работы. Предполагается, что количество объектов в предварительном портфеле (ПП) гораздо меньше числа исходных ИО. Результатом выполнения блоков 7 и 8 является формирование результирующего портфеля (РП), в котором количество ИО может быть значительно меньше количества ИО в ПП. Описание блоков 7 и 8 дается в § 3.

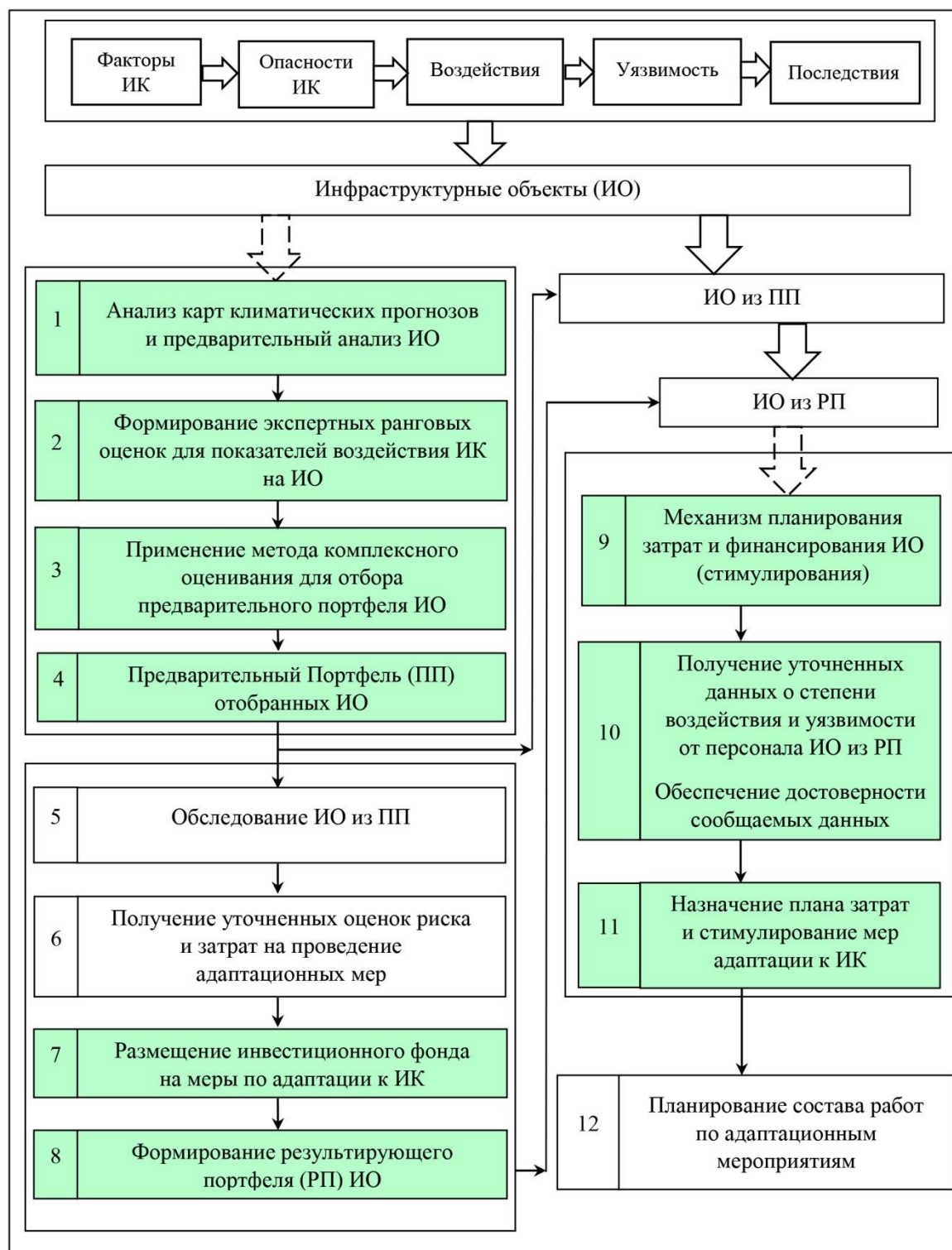


Рис. 2. Технология отбора ИО для проведения адаптационных мероприятий и механизм их инвестирования

Блоки 9–11 обозначают построение механизма планирования показателя, характеризующего объем адаптационных работ, и выбор функции стимулирования персонала ИО. При выборе механизма планирования и функции стимулирования ставится задача побудить персонал ИО сообщать в управляющий орган, осуществляющий управление вы-

полнением адаптационных мероприятий, достоверные данные о параметрах, характеризующих степени воздействия опасностей ИК на ИО и уязвимости объекта. Предполагается, что персонал ИО имеет более содержательные и точные данные о своем объекте, в отличие от управляющего органа. Описание блоков 9–11 приводится в § 3. При-

мом, что данные блоков 9–11 поступают на вход блока 12, в котором осуществляется детальное планирование адаптационных работ на ИО. Содержание этого блока опирается на специфику конкретного ИО и в статье не рассматривается.

2. ПОДДЕРЖКА РЕШЕНИЙ ПО ОЦЕНКЕ И ОТБОРУ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Пусть на заданной территории страны расположено большое число ИО, которые, как предполагается, в различной степени подвержены влиянию ИК. Естественно принять, что не на всех объектах могут быть реализованы адаптационные мероприятия к ИК. Это связано как с возможной незначительностью воздействий и, соответственно, риска негативного влияния ИК на некоторых объектах, так и с ограниченностью инвестиционного фонда для проведения адаптационных мероприятий. Следовательно, требуется из множества заданных ИО отобрать те объекты, на которых будут проводиться адаптационные мероприятия. Отметим, что отбор следует проводить по мере уменьшения риска негативного влияния ИК. Оценка этого риска для каждого ИО – это, вообще говоря, трудоемкая и дорогостоящая процедура, требующая затратных исследований и диагностики объекта. Поэтому проведение этой процедуры в полном объеме для всех ИО практически невозможно. Кроме того, как обсуждалось в § 1, проведение этой процедуры не всегда возможно в силу неопределенностей различной природы. В этих условиях приходится применять подход, основанный на комбинации регулярных методов и экспертных оценок.

Выделим два этапа решения этой задачи. На первом этапе будем формировать расширенный перечень объектов-претендентов (портфель ПП) на реализацию адаптационных решений с использованием экспертных мнений для оценки риска.

На втором этапе будем предполагать, что можно сформировать достаточно адекватные численные оценки потребности инвестиций на проведение адаптационных мероприятий и оценки риска негативного влияния ИК для ИО, отобранных на первом этапе. Будем считать, что для ограниченного набора ИО, сформированного на первом этапе, получение таких оценок возможно. Этот этап требует проведения исследований и включает уточненную оценку рисков на основе углубленного аудита ИО, прогноза возможных последствий и ущерба от ИК на основе метеорологического и

гидрологического мониторинга, климатических прогнозов и прогнозирования степени уязвимости ИО с учетом их развития и амортизации.

Для оценки необходимости реализации сложных инфраструктурных проектов по поддержке адаптационных решений на первом этапе предлагается применять механизм комплексного оценивания [18]. Принципиальная схема формирования и реализации этого механизма предполагает следующую последовательность действий.

1. Сформировать по возможности исчерпывающий список ИО, на которых, возможно, потребуются реализовать проекты адаптационных мероприятий.

2. Определить набор факторов опасностей ИК, влияющих на риск неблагоприятных воздействий ИК на ИО.

3. Сформировать дерево свертки показателей, характеризующих факторы опасностей и ущерба от ИК для всех ИО. Исходные показатели ущерба и характеристики факторов опасностей должны соответствовать листьям дерева.

4. Для каждого показателя ущерба и фактора опасности ИК определить дискретные (ранговые) шкалы измерений. Непрерывные шкалы преобразуются (в соответствии с устанавливаемыми алгоритмами) в дискретные для обеспечения возможности сопоставления их с показателями, которые изначально измеряются в ранговых шкалах. Для ограничения размерности процедур оценивания число рангов рекомендуется выбирать равным трем или четырем.

5. Для каждой вершины дерева, построенного согласно п. 1, назначить матрицу попарной свертки показателей. Эти матрицы строятся следующим образом. Число строк матрицы соответствуют размерности дискретной шкалы первого показателя из пары, а число столбцов равно размерности дискретной шкалы второго показателя. Элементам матрицы назначаются значения свертки показателей, имеющих значения первого и второго показателей. Для каждого ИО определяются ранговые значения всех показателей.

6. При движении по дереву от «листьев к корню» с помощью матриц свертки вычисляются промежуточные и итоговые значения комплексной оценки.

Рассмотрим пример построения системы комплексного оценивания объектов для формирования предварительного списка ИО. Примем, что на ИО действуют следующие факторы опасностей: осадки, паводок, оползень, спływ, размыв, циклон. Именно эти факторы свойственны ИО, наиболее

подверженных влиянию климатических воздействий Дальневосточного и Южного федеральных округов России. Для каждого из перечисленных факторов опасностей установим шкалу из четырех рангов. Ранги для каждого ИО, с учетом места его расположения, устанавливаются исходя из анализа карт климатических прогнозов. На рис. 3 приведен пример таких карт, описывающих изменение сезонных сумм осадков.

Обратим внимание, что на картах интенсивность осадков распределена по 17-ти градациям, обозначенным разным цветом. Сопоставляя изменение сумм осадков (соответствующих изменению раскраски) в определенной точке на двух картах, можно сформировать шкалу рангов для фактора «осадки». На участке расположения ОИ по картам рассматривается изменение степени окраски карт. Все изменения по рассматриваемым факторам опасности ИК разделим на четыре ранга, соответствующие: критически неблагоприятным изменениям (ранг равен 4), сильным изменениям (ранг равен 3), слабым (ранг равен 2) и незначительным или отсутствующим (ранг равен 1). Такие действия выполняются для всех факторов опасностей. Таким образом, для каждого ИО по каждому из соответствующих ему факторов опасности присписывается некоторое значение ранга.

Опишем теперь формирование рангов ущерба от фактора опасности. Ранг ущерба зависит от степени воздействия фактора опасности, степени уязвимости ИО и последствий. Пример структуры формирования этого ранга представлен на рис. 4.

Формирование комплексной оценки предполагает при определении шкал и рангов показателей ИО использование мнений экспертов об уязвимо-

сти объектов и о возможном ущербе. В качестве экспертов предлагается пригласить представителей региональных организаций, ответственных за содержание работоспособности инфраструктуры.

В нижней части рис. 4 представлены исходные данные для формирования комплексной оценки ущерба для каждого фактора опасности, рассматриваемого ИО. Формирование этой оценки предполагает при определении шкал и рангов показателей ИО использование мнений экспертов о степени воздействия, об уязвимости и о возможных последствиях для рассматриваемого фактора опасности. В верхней части рис. 4 представлена схема преобразования исходных ранговых показателей в итоговый ранговый показатель ущерба с использованием матриц свертки для рассматриваемого фактора опасности.

Примем, что всем исходным показателям присваиваются ранговые шкалы из четырех рангов: 1, 2, 3, 4. Ранги, равные 4, соответствуют максимальной уязвимости, максимальному воздействию, критическим значениям прямых и косвенных последствий. Ранги, равные 3, соответствуют умеренным значениям этих характеристик, 2 – слабым значениям, 1 – нейтральной уязвимости (отсутствию значимой уязвимости, воздействия, прямого и косвенных последствий).

Использование и формирование комплексных оценок основано на измерении исходных данных в порядковых шкалах. В работах [7,17] предлагается обоснование и приводятся примеры порядковых (ранговых) шкал оценки рисков для опасностей факторов ИК, а в работах [1–3] приводятся климатические карты, описывающие параметры ИК в порядковых шкалах.

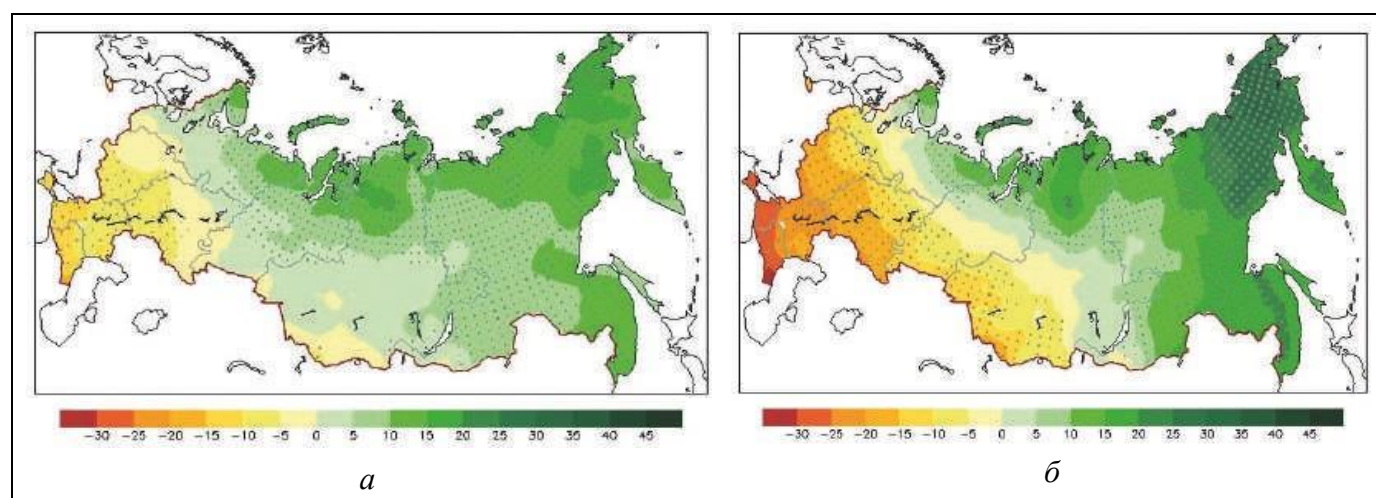


Рис. 3. Климатические карты [2], показывающие изменение средних сезонных (летних) сумм осадков (%) в период 2018–2100 гг. (а) по отношению к периоду 1995–2014 гг. (б)

Для оценки рангов и матриц свертки можно использовать подход и пример, рассмотренный в статье [18]. Обычно матрицы формируются на основе мнений экспертов. В докладе [21] исследуются проблемы формирования матрицы на основе обучающей выборки для системы комплексного оценивания. Здесь были предложены методы формирования матриц свертки показателей в составе системы комплексного оценивания на основе эмпирических данных. Опыт применения комплексного оценивания показал приемлемость использования следующей схемы. Сначала матрицы свертки формируются из здравых соображений и консультаций с потенциальными пользователями системы, а затем корректируются в процессе опытной эксплуатации.

Приведем пример заполнения матриц свертки для схемы, изображенной на рис. 4.

Исходные данные для вычисления рангов опасностей на основе шкалы воздействия чувствительности к климатическим факторам приведены в табл. 1.

На основе табл. 1 для каждой характеристики ущерба рассчитываются значения соответствующих рангов. После этого по схеме, изображенной на рис. 4, с использованием матрицы свертки определяются комплексные оценки ущерба. Для расчета по этой схеме необходимо заполнить элементы матрицы свертки. Сначала производится свертка рангов воздействия и уязвимости. В табл. 2 приведен вариант заполнения соответствующей матрицы.

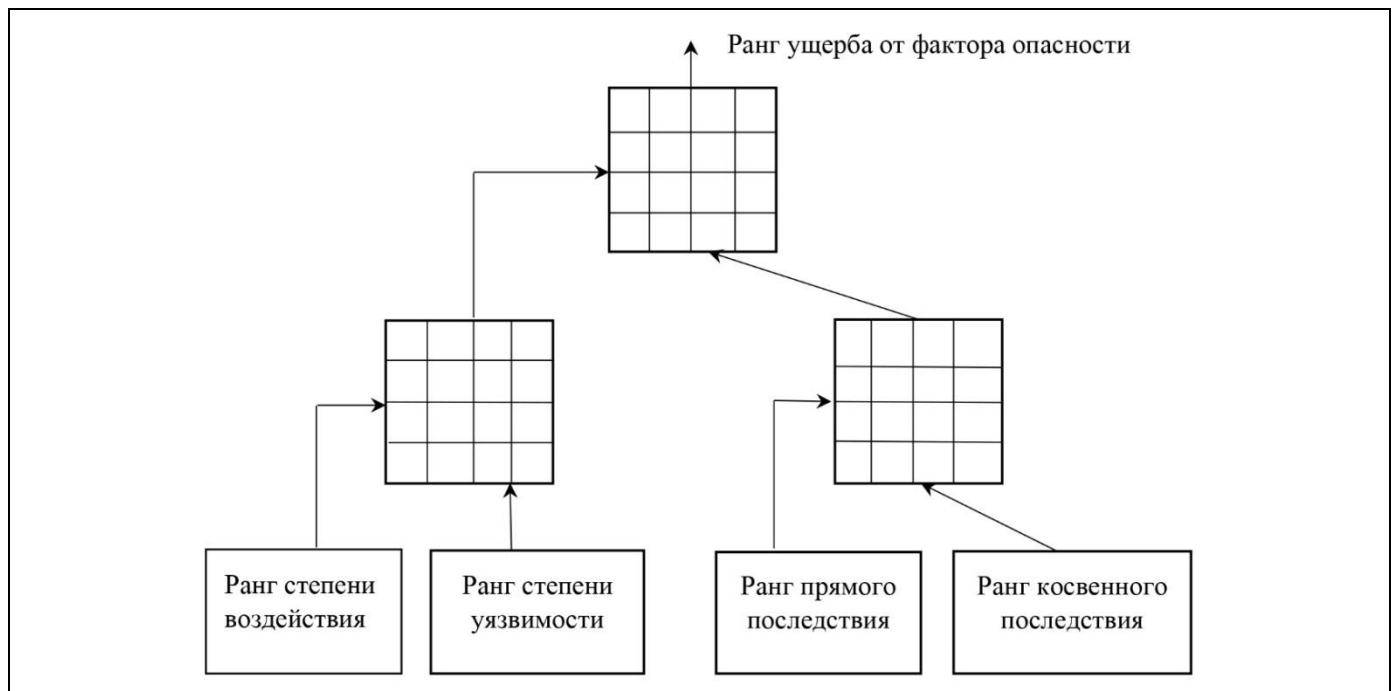


Рис. 4. Формирование ранга ущерба от фактора опасности

Таблица 1

Шкалы показателей для расчета рангов ущерба от фактора опасности

Значение ранга	Характеристики ущерба ИО			
	Воздействие	Уязвимость	Прямые последствия	Косвенные последствия
1	Незначительное	Отсутствует	Отсутствуют	Отсутствуют
2	Слабое	Слабая	Приемлемые	Приемлемые
3	Ограничивающее	Средняя	Затратные	Затратные
4	Блокирующее	Высокая	Критические	Критические

Таблица 2

Матрица свертки рангов воздействия и уязвимости

Воздействие	Уязвимость			
	1	1	1	2
	1	2	2	3
	1	2	3	4
	1	3	4	4

Таблица 3

Матрица свертки рангов прямых и косвенных последствий

Прямые последствия	Косвенные последствия			
	1	1	2	3
	1	2	3	3
	3	3	4	4
	4	4	4	4

При расчете свертки по этим матрицам выбирается строка со значением ранга первого показателя и столбец с рангом второго показателя. Так, например, в первой свертке для ранга воздействия, равного 3, и ранга уязвимости, равного 4, выбирается третья строка и четвертый столбец. На их пересечении получаем свертку показателей, равную 4. Полученная свертка показателей является первым входным показателем (определяет строку итоговой матрицы свертки, см. табл. 3) для определения ранга опасности объекта. Расчет оценки по показателям прямых и косвенных последствий является вторым входным показателем и определяет номер столбца итоговой матрицы свертки.

Таблица 4

Итоговая матрица определения ранга ущерба ИО по одному из факторов опасности

Ранг первой свертки	Ранг второй свертки			
	1	1	2	2
	1	2	3	3
	2	3	4	4
	3	4	4	4

Таким образом, иерархическая система матричных свертки, представленная на рис. 4, позволяет оценить ранги ущерба для выбранного факто-

ра опасности рассматриваемого ИО. Результаты этих расчетов являются входными показателями для определения итоговой комплексной оценки риска рассматриваемого ИО (рис. 5).

Матрицы свертки рангов для факторов опасностей и рангов ущербов, изображенные на рис. 5, формируются с использованием мнений экспертов аналогично матрицам, приведенным в табл. 1–4.

Полученные комплексные оценки для каждого рассматриваемого ИО по схеме, представленной на рис. 5, используются для отбора наиболее подверженных опасностям объектов. Упорядочим все рассматриваемые ИО в порядке уменьшения ранга комплексной оценки. Таким образом определяются группы ИО, подверженных разным степеням опасности. Объекты, имеющие ранг 4 и 3 комплексной оценки, подлежат дальнейшему обследованию и являются кандидатами на выделение инвестиционных средств для проведения адаптационных мероприятий (формируют ПП, см. рис 2.)

С более подробным примером комплексной оценки проектов, детализирующим все этапы ее формирования и числовые характеристики исходных, промежуточных и итоговых показателей, а также обоснования корректности использования порядковых шкал и интерпретации их значений, можно ознакомиться в работе [18].

3. ИНВЕСТИЦИИ НА АДАПТАЦИЮ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА И РАСХОДОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

3.1. Механизм размещения инвестиций

Посредством рассмотренного выше метода оценки и предварительного отбора объектов формируется предварительный список объектов для дальнейшего изучения необходимости и возможности проведения адаптационных мероприятий. Для объектов из этого списка определяются более точные оценки риска и потребности в финансировании адаптационных мероприятий на основе дополнительного обследования объектов в местах их расположения. В случае невозможности проведения в полном объеме адаптационных мероприятий на всех объектах из предварительно оформленного списка в силу ограниченности инвестиционного фонда предлагается использовать процедуру размещения финансов на основе метода «оценка риска / затраты», идея которого взята из «жадного» алгоритма при решении задачи о ранце [22]. Суть этого метода заключается в последовательном выборе объектов и выделении требуемых им средств из имеющегося инвестиционного фонда в порядке

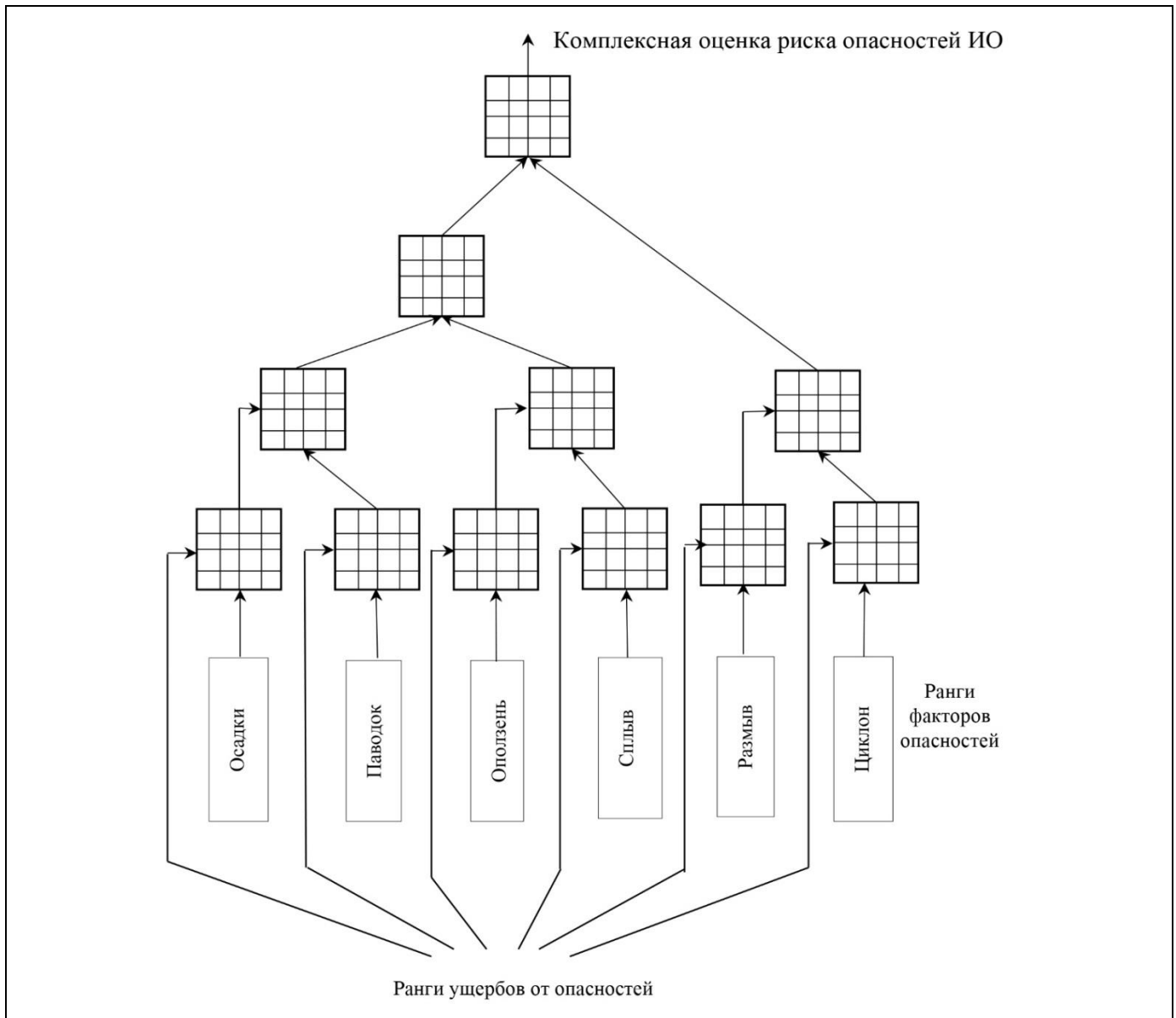


Рис. 5. Формирование комплексной оценки риска ИО

убывания значения показателя w_i/u_i , где w_i – оценка риска, u_i – требуемые средства. Известно [22], что «жадный» алгоритм, в общем случае не является оптимальным. Однако на практике часто размер инвестиционного фонда не является жестко фиксированным. При незначительном недостатке инвестиционных средств, как правило, имеется возможность увеличить фонд для включения еще одного проекта в портфель отбираемых объектов. В этом случае «жадный» алгоритм становится оптимальным.

При формировании инвестиционного портфеля для проведения адапционных мероприятий может оказаться, что включение объекта в портфель требует включения еще одного или нескольких объектов, связанных с ним технологически. Для

распределения инвестиционных средств в системе взаимосвязанных объектов предлагается воспользоваться алгоритмами, представленными в докладе [23].

3.2. Модель планирования и финансирования адапционных работ

После реализации механизмов предварительного размещения фондов между ИО для проведения адапционных мероприятий возникает задача планирования работ и финансирования в зависимости от их объема в рамках выделенного фонда.

Планирование адапционных работ и их финансовое обеспечение на отраслевом уровне могут осуществлять департаменты по экологии и без-

опасности, а также подразделения, отвечающие за развитие и содержание инфраструктуры. Например, в отрасли железнодорожных перевозок решение этих задач возложено на департаменты технической политики, экологии и техносферной безопасности, Центральную дирекцию инфраструктуры. Далее орган, ответственный за планирование и финансовое обеспечение будем условно называть управляющим органом (УО).

Для планирования УО использует информацию, получаемую от исполнителей адапционных мероприятий. В данном случае это сообщение информации от персонала, ответственного за выполнение работ на ИО. Предполагается, что представители ИО информированы об уязвимости ИО и возможном воздействии на объект в силу действия климатических факторов, в отличие от УО. При этом возникает проблема обеспечения неманипулируемости сообщаемых данных, так как представители объекта могут иметь собственные интересы в получении финансовых средств и плана по адапционным работам и могут пытаться путем искажения данных повлиять на план и финансирование. Рассмотрим абстрактную модель, описывающую эту проблему, которая может возникать на реальных объектах при управлении адапционными мероприятиями. В основе подхода к построению рассматриваемой ниже модели лежат результаты теории активных систем и организационного управления [19, 20, 24, 25] с учетом специфики рассматриваемого ИО.

Пусть y – размер ущерба, причиняемого воздействием изменений климата, g – фонд финансирования, выделенный на рассматриваемый ИО. Примем, что в рассматриваемой системе присутствует УО, осуществляющий планирование и выделение средств из фонда финансирования, и Агент, являющийся представителем объекта, см. рис. 6. Обозначим ξ воздействие климатических изменений на объект, r – параметр, характеризующий уязвимость объекта, где $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, $r_1 \leq r \leq r_2$.

Примем, что УО, в отличие от Агента, не знает точные значения параметров ξ и r . Пусть УО знает только возможные границы значений этих параметров $\eta_1 \leq \xi \leq \eta_2$, $s_1 \leq r \leq s_2$, где $\eta_1 \leq \xi_1$, $\xi_2 \leq \eta_2$, $s_1 \leq r_1$, $r_2 \leq s_2$.

Определим порядок функционирования рассматриваемой системы, состоящей из УО и Агента [19, 20, 24, 25].

На первом шаге УО устанавливает механизм управления, который состоит из:

- процедуры планирования адапционных работ $x = \pi(\eta, s)$, где x – план адапционных работ,

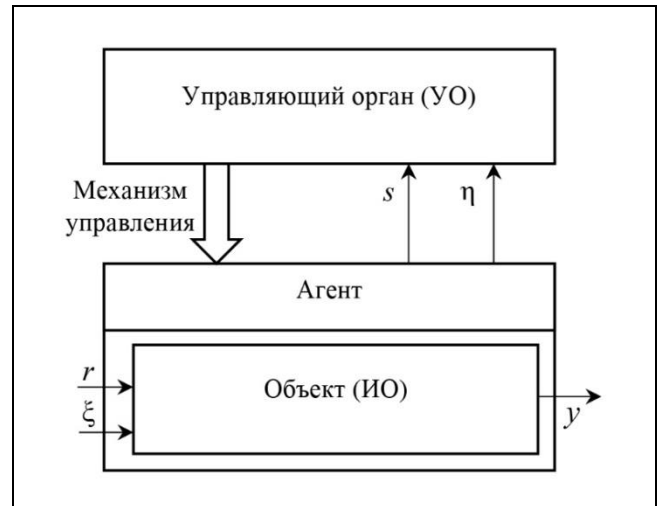


Рис. 6. Структура взаимодействия УО и Агента

η – информация о параметре воздействия на объект, s – информация о значении параметра уязвимости;

- процедуры финансирования (стимулирования) адапционных работ $\sigma(x)$, где $\sigma(x) \leq \tau g$, g – фонд финансирования адапционных работ, τg – доля фонда, направляемого на стимулирование, $0 < \tau < 1$;

- функции штрафов за отклонение размера освоения финансов z работ по адаптации от установленного плана, $\chi(x, z)$, $\chi(x, z) \geq 0$, $\chi(z, z) = 0$.

Примем $x, z \in X(x^0, \xi, r) \in X^0 = [0, x^0]$, где x^0 – максимальный объем требуемых адапционных мероприятий для полного нивелирования климатических воздействий на объект при максимальных уровнях воздействия и уязвимости.

Заметим, что УО при назначении функции штрафа не знает заранее, как будут выполняться адапционные работы в перспективе, но он устанавливает в составе механизма управления для Агента правило наказания за невыполнение плана.

Второй шаг осуществляет Агент. Этот шаг заключается в сообщении Агентом оценок η воздействия на объект и s уязвимости объекта. После этого Агенту в соответствии с установленным механизмом становятся известны план адапционных работ $x = \pi(\eta, s)$ и объем финансирования $\sigma(x)$ при условии выполнении плана.

Пусть ущерб от изменения климата описывается зависимостью $y = y(z, \xi, r)$, т. е. ущерб зависит от объема адапционных работ z , воздействия ξ и уязвимости r . Естественно предположить, что функция $y(z, \xi, r)$ не возрастает по z и не убывает по ξ и r .

Целевую функцию Агента представим в виде $f(x, z, \xi, r) = \sigma(z) - \zeta(z, \xi, r) - \chi(x, z)$, где $\zeta(z, \xi, r)$ – функция затрат Агента на реализацию работ z . Предположим, что $\zeta(z, \xi, r) \geq 0$, $\zeta(0, \xi, r) = 0$, $\zeta(z)$ дважды дифференцируема, и смешанные производные существуют.

Целевую функцию УО запишем в виде $\Phi(y, g) = F(y) + \lambda g$, где $F(y)$ – возрастающая функция, λ – параметр, определяющий ценность для УО выделяемого фонда g .

Примем, что Агент при выборе сообщений и объема работ стремится максимизировать свою целевую функцию. При выборе механизма управления УО стремится минимизировать свою целевую функцию $\Phi(y, g)$.

Опишем выбор Агентом действий и сообщений. Из принятого принципа поведения Агента, максимизации целевой функции, имеем при выборе финансирования работы

$$\begin{aligned} \varphi(x, \xi, r) &= \sigma(z^*) - \zeta(z^*, \xi, r) - \chi(x, z^*) = \\ &= \max_{z \in X} [\sigma(z) - \zeta(z, \xi, r) - \chi(x, z)]. \end{aligned}$$

Сообщения Агента определяются из условия $\varphi(\pi(\eta^*, s^*), \xi, r) = \max_{\substack{\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2 \\ s_1 \leq s \leq s_2}} \varphi(\pi(\eta, s), \xi, r)$, т. е. Агент

при сообщении информации стремится получить план, доставляющий максимум его функции предпочтения.

Здесь предполагается, что составляющие целевой функции Агента таковы, что соответствующие максимумы существуют.

Постановки задач.

А) Определить механизм управления, обеспечивающий неманипулируемость, т. е заинтересованность Агента сообщать в УО достоверные данные о параметрах воздействия и уязвимости, $\eta^* = \xi$, $s^* = r$, и стремиться выполнять план $z^* = x$.

Б) Определить оптимальный механизм на множестве заданных механизмов M :

$$\begin{aligned} \Phi(y, g) &= F(y(z^*, \xi, r)) + \lambda g = \\ &= F(y(z^*(\pi(\eta^*, s^*), \xi, r))) + \lambda g \rightarrow \min_{m \in M}. \end{aligned}$$

Перейдем от рассмотренного описания модели к более конкретному. Примем, что параметры воздействия и уязвимости измеряются в относительных единицах, т. е. $\xi \in [0, 1]$, $r \in [0, 1]$. Это означает, что при $\xi=0$ воздействие на объект отсутствует, а при $\xi=1$ оно максимальное. Соответственно, при $r=0$ неуязвимость объекта полностью обеспечена, а при $r=1$ уязвимость максимальная, приводящая к прекращению его функционирования.

Пусть $y = b(x^0 p - z)$, где x^0 – максимальная величина адаптационных мероприятий при максимальных воздействиях и уязвимости, $p = \xi r$, b – заданный параметр, $b > 0$; функция затрат равна

$$\zeta(z, \xi, r) = \zeta(z, px^0) = \frac{\beta px^0}{px^0 - z}, \text{ где } \beta > 0. \text{ Функция}$$

затрат пропорциональна степени воздействия и уязвимости объекта и обратно пропорциональна степени ущерба. Обратная пропорциональность степени ущерба означает, что Агент несет большие затраты на действия по снижению ущерба. Рассматриваемая функция затрат выбрана из этих соображений. Вообще говоря, в модели можно использовать и другую функцию затрат. Необходимо только требовать выполнения следующих свойств ее производных [26]: $\zeta'_z(z, p) > 0$, $\zeta''_{zz}(z, p) > 0$, $\zeta'_p(z, p) < 0$, $\zeta''_{zp}(z, p) < 0$.

Из $\eta_1 \leq \xi \leq \eta_2$, $s_1 \leq r \leq s_2$ следует $q_1 = \eta_1 s_1 \leq q = \eta s \leq \eta_2 s_2 = q_2$, где q – сообщаемая Агентом в УО оценка параметра p .

Примем, что функция штрафов

$$\chi(x, z) = \begin{cases} v, & \text{если } x \neq z, \\ 0, & \text{если } x = z, \end{cases}$$

где $v > 0$.

Пусть $F(y) = By$, где параметр $B > 0$ обозначает размер ущерба в денежном выражении для сопоставления с величиной λg ценности фонда g .

Отметим, что $y \geq 0$ и соответственно $z \in X(p) = [0, x^0 p] \in X^0 = [0, x^0]$.

При сделанных предположениях о компонентах целевые функции УО и Агента принимают вид

$$\Phi(y, g) = By + \lambda g = Bb(x^0 p - z) + \lambda g,$$

$$f(x, z, \xi, r) = \sigma(z) - \frac{\beta px^0}{px^0 - z} - \chi(x, z). \quad (1)$$

3.3. Обеспечение сообщения Агентом неискаженных данных и выполнения плана

Пусть задана функция финансирования $\sigma(z)$. Для определения условия сообщения неискаженных данных и выполнения плана воспользуемся результатами исследований [26, 27].

Рассмотрим множество $P(p) = \{u \mid \sigma(u) - \zeta(u) \geq \sigma(z) - \zeta(z, p) - \chi(x, z), u \in X, z \in X\}$. Это множество определяет все планы, которые Агенту вы-



годно выполнить. После подстановки формулы (1) в выражение для $P(p)$ получим

$$P(p) = \{u \mid \sigma(u) - \frac{\beta px^0}{px^0 - u} \geq \sigma(z) - \frac{\beta px^0}{px^0 - z} - \nu, (u, z) \in [0, px^0]\}.$$

В случае выполнения плана целевая функция Агента равна $\varphi(x, p) = f(x, x, p) = \sigma(x) - \frac{\beta px^0}{px^0 - x}$.

Из теоремы 1 [27] следует, что при процедуре планирования $\pi^*(\eta, s) = \pi^*(q)$, где $q = \eta s$, необходимые и достаточные условия сообщения Агентом достоверных данных и выполнения плана относительно воздействия и уязвимости при процедуре планирования формулируются следующим образом: обеспечивается сообщение достоверных данных и выполнение плана тогда и только тогда, когда для любых допустимых сообщений (η, s) таких, что $0 \leq \eta \leq 1$, $0 \leq s \leq 1$, существуют множества ограничения согласования X^c , для которых справедливо $X^c \cap P(q) \neq \emptyset$ и

$$\varphi(\pi^*(q), q) = \max_{x \in X^c \cap P(q)} \varphi(x, q),$$

или

$$\begin{aligned} \sigma(\pi^*(q)) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - \pi^*(q)} &= \\ &= \max_{x \in X^c \cap P(q)} [\sigma(x) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - x}], \end{aligned} \quad (2)$$

Пример. Пусть функция финансирования линейна, $\sigma(x) = kx$, $X^c = [0, x^0]$, $\nu \geq kx^0$, $\alpha = 0$. Из формулы (2) получаем процедуру планирования $\pi^*(q) = qx^0 - \sqrt{\beta qx^0 / k}$, обеспечивающую сообщение достоверных данных $\eta = \xi$, $s = r$.

Условие (2) позволяет определить решение задачи А) о неманипулируемости механизма.

3.4. Оптимальный механизм расходования средств на адаптационные работы

Для определения оптимального механизма воспользуемся методологией, описанной в работе [26]. Заметим, что целевая функция УО достигает минимума по z , равного λg , при $z = x^0 p$ и максимума $Bbx^0 p + \lambda g$ при $z = 0$, т. е. $\lambda g \leq \Phi(y, g) \leq$

$\leq Bbx^0 p + \lambda g$. Введем в рассмотрение параметр γ , определяющий максимальный требуемый уровень целевой функции УО, $\lambda g \leq \Phi(y, g) \leq \gamma$. Параметр γ принимает значение на отрезке $[\lambda g, Bbx^0 p + \lambda g]$. Рассмотрим множество пар (p, z) для фиксированного значения параметра γ , для которых

$$Bb(x^0 p - z) + \lambda g \leq \gamma. \quad (3)$$

Обозначим это множество $Q_\gamma = \{(p, z) \mid Bb(x^0 p - z) + \lambda g \leq \gamma\} = \{(p, z) \mid z \geq px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}\}$. Рассмотрим процедуры планирования, аргумент и соответствующее ему значение которых принадлежат множеству Q_γ и которые удовлетворяют условию (2). Эти процедуры планирования в случае сообщения Агентом достоверной информации обеспечивают значение целевой функции УО не больше, чем γ .

Перепишем неравенство (3) в виде $z \geq px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$. Соответственно, нижней границу множества Q_γ запишем в виде равенства $z = px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$.

Для простоты рассмотрим случай «сильного штрафа» [24], когда величина штрафа ν достаточно велика, например, $\sigma(z) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - z} < \nu$ при любых допустимых z . При таком штрафе выбор Агентом объема работы z совпадает с планом, $z = x$.

Рассмотрим необходимые условия экстремума для целевой функции Агента $f'_x(x, x, \xi, r) = 0$, которые в соответствии с формулой (1) можно переписать в виде

$$\sigma'(x) = \frac{\beta x^0 p}{(x^0 p - x)^2}. \quad (4)$$

Найдем функцию стимулирования, обеспечивающую выполнение необходимых условий экстремума на нижней границе множества Q_γ , а именно при $x = x^0 p - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$. Перепишем это равенство в виде $p = [x + \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}] / x^0$ и подставим в формулу (4). Получаем уравнение

$$\sigma'(x) = \beta \frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} x + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g}.$$

Отсюда получаем выражение для функции финансирования, обеспечивающей максимум целевой функции Агента на границе множества Q :

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= \beta \int_0^x \left[\frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} t + \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} \right] dt = \\ &= \beta \frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x^2 + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная функция финансирования (5) вместе с процедурой планирования

$$\pi^*(q) = x^0 q - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb} \quad (6)$$

описывают структуру оптимального механизма и обеспечивают значение критерия для УО не выше γ . Оценим теперь минимальное значение параметра γ и тем самым найдем оптимальный механизм. Определим план и финансирование для наилучшей оценки $q = q_2$:

$$\begin{aligned} x_2 = \pi^*(q_2) &= x^0 q_2 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}, \\ \sigma(x_2) &= \beta \frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x_2^2 + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x_2. \end{aligned}$$

Минимальное значение $\gamma = \gamma^*$ можно определить из условия полного использования фонда финансирования τg , направляемого на стимулирование работ, решив относительно γ уравнение

$$\sigma(x_2) = \beta \left[\frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x_2^2 + \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x_2 \right] = \tau g \quad (7)$$

на отрезке $[\lambda g, Bbx^0 q_2 + \lambda g]$.

Подставляя выражение для x_2 и сократив подобные члены, уравнение (7) можно переписать в виде

$$\frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} (x^0 q_2)^2 = \frac{2\tau g}{\beta}.$$

Отсюда имеем

$$\gamma^* = \gamma = \lambda g + \begin{cases} Bbx^0 q_2 \sqrt{\frac{\beta}{2\tau g}}, & \text{если } \frac{\beta}{2\tau g} \leq 1, \\ Bbx^0 q_2, & \text{если } \frac{\beta}{2\tau g} > 1. \end{cases}$$

Выражения (5) и (6) при $\gamma = \gamma^*$ определяют решение задач А) и Б).

Модель планирования и финансирования адаптационных работ, с одной стороны, является детализацией модели, рассмотренной в работе [26] и учитывающей специфику включения параметров

воздействия и уязвимости. С другой стороны, она является обобщением из-за включения в целевую функцию УО зависимости от фонда финансирования. Дело в том, что для функции затрат более общего вида, рассматриваемой в статье [26], не удастся в явном виде разрешить уравнения и получить в явном виде оптимальные функцию стимулирования и процедуру планирования, обеспечивающие сообщение в УО достоверных данных. Для функции затрат, рассматриваемой в предлагаемой модели, это удастся сделать. Отметим, что работа [26] развивает предшествующие результаты [24, 25], а именно получено решение задачи синтеза оптимального механизма, включающего процедуру планирования, функцию поощрения и функцию штрафов в условиях неполной информированности УО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупномасштабность инфраструктуры, наличие многофакторной неопределенности и необходимость принятия неотложных решений приводят к значительным трудностям формирования программы адаптационных работ, определения технических решений и их реализации.

В этих условиях оправданно применение даже ограниченно рациональных решений. Особенно это справедливо на начальных этапах, предшествующих более глубокому обследованию объектов, требующему значительных финансовых и временных затрат для приемлемой диагностики объектов, уточнения климатических прогнозов с учетом местных особенностей ландшафта, состояния верхнего слоя земной поверхности, состояния износа инфраструктурных объектов.

В статье предложены три возможности применения ограниченно рациональных решений.

Первая возможность – это определение на первом этапе первоначального списка претендентов для проведения адаптационных мероприятий методом комплексного оценивания, в котором существенно используются мнения экспертов.

Вторая возможность – после выполнения соответствующих исследований объектов из предварительного списка, сформированного на первом этапе, для них определяются уточненные оценки риска негативного влияния изменения климата и требуемые инвестиции. С использованием этих оценок предлагается формировать результирующий список объектов. Для этого предлагается размещать инвестиционные средства в последовательности уменьшения удельного показателя риска для каждого объекта до тех пор, пока не будет исчер-



пан инвестиционный фонд. Этот удельный показатель равен отношению оценки риска к оценке требуемых инвестиций на адаптационные мероприятия для рассматриваемого объекта.

Третья возможность – это разработка и применение механизма стимулирования выполнения адаптационных работ, обеспечивающего получение достоверных данных от персонала инфраструктурных объектов и рациональное использование инвестиционных вложений.

В перспективе возможность уточнять прогнозы изменений климата в процессе реализации адаптационных мероприятий делает целесообразным применение дорожных карт, в которых учитываются развитие технологий, развитие инфраструктуры и разные сценарии изменения климата. Дорожная карта в данном случае представляет собой описание плановых траекторий реализации мероприятий по противодействию негативным последствиям изменения климата, учитывающим необходимость смещения парадигмы от реагирования на стихийные бедствия после их возникновения в сторону проактивного подхода к снижению опасности бедствий на основе метеорологического, гидрологического и климатического мониторинга и прогнозов. В дорожной карте определяется во временном разрезе возможный порядок реализации адаптационных мероприятий с учетом возможных сценариев прогнозов изменения климата и прогнозируемых сценариев развития инфраструктуры. Например, для железнодорожного транспорта это включает развитие дорог, подвижного состава, видов используемого топлива и энергии для движения поездов, систему управления движением, системы автоматизации и телемеханики. Дорожная карта основывается на долгосрочном прогнозе климата и развития инфраструктуры и периодически уточняется в зависимости от изменения соответствующих прогнозов и результатов метеорологического, гидрологического и климатического мониторинга (например, каждые 5 лет).

В перспективе также необходимо создание единой информационной системы прогнозирования изменения климата на основе систем искусственного интеллекта и текущего мониторинга, а также создания цифровых двойников объектов инфраструктуры, позволяющей проводить анализ изменения климата, состояния уязвимости инфраструктурных объектов и оценку рисков неблагоприятных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / под ред. В.М. Катцова, – Санкт-Петербург: Климатический центр Росгидромета, 2017. – 106 с. – URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Report on climatic risks in the Russian Federation. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet) / Ed. by V.M. Kattsova. – St. Petersburg: Climatic Center of Roshydromet, 2017. – 106 p. – URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (accessed September 10, 2023). (In Russian)]

2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. – СПб.: Научное издание технологий, 2022. – 124 с. [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). The Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary. – St. Petersburg: High technology, 2022. – 124 p. (In Russian)]
3. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева. – СПб.: Климатический центр Росгидромета, 2020. – 120 с. – URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Report on the Scientific and Methodological Basis for the Development of Adaptation Strategies to Climate Change in the Russian Federation (In the Area of Competence of Roshydromet). Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet) / Ed. by V.M. Kattsova, B.N. Porfiryeva. – St. Petersburg: Climate Center of Roshydromet, 2020. – 120 p. – URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf> (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
4. Адаптация к изменениям климата. Принципы, требования и руководящие указания (ISO 14090:2019, IDT). Национальный стандарт Российской Федерации. – М: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2019. – 32 с. – URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/gost_r_iso_14090-2019.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Adaptation to climate change. Principles, Requirements and Guidelines (ISO 14090:2019, IDT). National Standard of the Russian Federation. – Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2019. – 32 p. – URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/gost_r_iso_14090-2019.pdf (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
5. Медведев А.А. Адаптация к климатическим изменениям: глобальный эколого-экономический тренд и его значение для России // Вестник Московского областного университета. Серия: Естественные науки. – 2018. – № 4. – С. 11–19. – DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19. [Medvedev, A.A. Adaptation to Climate Change: Global Environmental and Economic Trend and Its Significance for Russia // Bulletin of the Moscow Regional University. Series: Natural Sciences. – 2018. – No. 4. – P. 11–19. – DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19. (In Russian)]
6. Быков А.А. О рисках изменения климата и устойчивого развития // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 8–14. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-8-14>. [Bykov A.A. On the Risks of Climate Change and

- Sustainable Development // Problems of Risk Analysis. – 2021. – Vol. 18, no. 4. – P. 8–14. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-8-14>. (In Russian)]
7. *Мухеев П.Н.* О подходах к учету рисков изменения климатических условий при планировании и реализации нефтегазовых проектов // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 52–65. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65>. [Mikheev, P.N. On Approaches to Taking into Account the Risks of Changes in Climate Conditions When Planning and Implementing Oil and Gas Projects // Problems of Risk Analysis. – 2021. – Vol. 18, no. 1. – P. 52–65. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65>. (In Russian)]
 8. *Апулу О.Г., Потравный И.М., Вега А.Ю.* Эколого-экономическое обоснование выбора технологий рекультивации загрязненных нефтью земель. – М.: Экономика, 2021. – 136 с. [Apulu, O.G., Potravny, I.M., Vega, A.Yu. Ecological and Economic Justification for the Choice of Technologies for Reclamation of Oil-Contaminated Lands. – М.: Economy, 2021. – 136 p. (In Russian)]
 9. *Хлебникова Е.И., Дацюк Т.А., Салль И.А.* Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – № 574. – С. 125–178. [Khlebnikova, E.I., Datsyuk, T.A., Sall, I.A. Impact of Climate Change on Construction, Land Transport, Fuel and Energy Complex // Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after. A.I. Voeikova. – 2014. – No. 574. – P. 125–178. (In Russian)]
 10. *Черешнюк С.В., Тимашова Л.В.* Учет, мониторинг и прогноз климатических условий при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередачи. карты климатического районирования // Энергия единой сети. – 2021. – № 4 (59). – С. 65–75. [Chereshnyuk, S.V., Timashova, L.V. Accounting, Monitoring and Forecasting of Climatic Conditions during the Design and Operation of Overhead Power Lines. Maps of Climatic Zoning // Energy of a Single Network. – 2021. – No. 4 (59). – P. 65–75. (In Russian)]
 11. *Влияние климатических рисков и устойчивое развитие финансового сектора Российской Федерации. Доклад для общественных консультаций.* – М: Центральный банк Российской Федерации, 2020. – 34 с. – URL: http://www.cbr.ru/content/document/file/108263/consultation_paper_200608.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Impact of Climate Risks and Sustainable Development of the Financial Sector of the Russian Federation. Report for Public Consultation. – М: Central Bank of the Russian Federation, 2020. – 34 p. – URL: http://www.cbr.ru/content/document/file/108263/consultation_paper_200608.pdf (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
 12. *Palin, E., Stipanovic Oslakovic, I., Gavin, K., Quinn, A.* Implications of Climate Change for Railway Infrastructure // WIREs Climate Change. – 2021. – Vol. 12, no. 5. – DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.728>.
 13. *Operation and Construction Measures for Ensuring Climate-Resilient Railway Infrastructure // Climate ADAPT.* – 2021. – URL: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/operation-and-construction-measures-for-ensuring-climate-resilient-railway-infrastructure> (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 14. *Weather Resilience and Climate Change Adaptation Strategy. Safety, Technical and Engineering.* – London: Network Rail, 2017. – URL: <https://safety.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/NR-WRCCA-Strategy-2017-2019.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 15. *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report.* – London: Rail Safety and Standards Board Ltd., 2016. URL: https://adaptationscotland.org.uk/download_file/view_inline/390 (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 16. *Dawson, R., Thompson, D., Johns, D., et al.* A Systems Framework for National Assessment of Climate Risks to Infrastructure // Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, physical, and Engineering Sciences. – 2018. – 376. – Art. no. 20170298.
 17. *Последствия изменения климата для международных транспортных сетей и адаптация к ним.* – Нью-Йорк–Женева: ООН, 2013. – 270 с. – URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014r.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks. – New York–Geneva: UN, 2012. – 248 p. URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014r.pdf (accessed September 10, 2023).]
 18. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И., Федянин Д.Н.* Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта) I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 74. – С. 81–107. [Burkov, V., Enaleev, A., Strogonov, V., and Fedyanin, D. Models and Management Structure for the Development and Implementation of Innovative Technologies in Railway Transportation. I. Mechanisms of Priority Projects Selection and Resource Allocation. // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81, no. 7. – P. 1316–1329.]
 19. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами / 3-е изд. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 584 с. [Novikov, D.A. Theory of Management of Organizational Systems / 3rd ed. – Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2012. – 584 s. (In Russian)]
 20. *Механизмы управления / под ред. Д.А. Новикова.* Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с. [Mechanism Design and Management. Mathematical Methods for Smart Organizations / In: Business Issues, Competition and Entrepreneurship. – NOVA publishers: New York, 2013. – 187 p.]
 21. *Korgin, N.A., Sergeev, V.A.* Identification of Integrated Rating Mechanisms on Complete Data Sets // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2021. – Vol. 630. – P. 610–616.
 22. *Merer, H.K., Pferschy, U., Pisinger, D.* Knapsack Problem. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 546 p.
 23. *Бурков В.Н., Еналеев А.К.* Обобщенная задача о ранце // Тр. одиннадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018)». – Москва, 2018. – Т. 1. – С. 117–123. [Burkov, V.N., Enaleev, A.K. Optimal Resource Allocation in Network Structures // Proceedings of 11th Conference Management of Large-Scale System Development MLSD'2018. – Moscow: IEEE, 2018. – P. 1–5. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551936>.]
 24. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с. [Burkov, V.N. Fundamentals of the Mathematical Theory of Active Systems. – М: Nauka, 1977. – 255 s. (In Russian)].



25. Бурков В.Н., Еналеев А.К. Оптимальность принципа открытого управления. Необходимые и достаточные условия достоверности информации в активных системах // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 3. – С. 73–80. [Burkov, V.N., and Enaleev, A.K. Optimality of the Principle of Open Control. Necessary and Sufficient Conditions for Reliability of Information in Active Systems // Automation and Remote Control. – 1985. – Vol. 46, no. 3. – P. 341–348.]
26. Еналеев А.К. Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 33. – С. 143–166. [Enaleev, A.K. Optimal Incentive-Compatible Mechanisms in Active Systems // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, no. 3. – P. 491–505.]
27. Еналеев А.К. Правильные механизмы планирования в активных организационных системах с обменом информацией // Труды шестнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023). – Москва, 2023. – С. 1655–1662. [Enaleev, A. Plan Implementation and Data Revelation in Active Organizational Systems // 16th International Conference «Management of large-scale system development» (MLSD'2023). – Moscow: IEEE, 2023. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303997.]

Статья представлена к публикации руководителем РПС Г. А. Угольником.

Поступила в редакцию 17.12.2023,
после доработки 15.02.2024.
Принята к публикации 21.02.2024.

Вега Анна Юрьевна – канд. экон. наук, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва,
✉ Vega.AY@rea.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1002-8317>

Еналеев Анвер Касимович – канд. техн. наук, Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ anverena@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4450-9533>

© 2024 г. Вега А. Ю., Еналеев А. К.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

INTEGRATED CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT AND AN ADAPTATION FINANCING MECHANISM FOR INFRASTRUCTURE FACILITIES

A. Yu. Vega* and A. K. Enaleev**

*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,

**Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ Vega.AY@rea.ru, **✉ anverena@mail.ru

Abstract. This paper addresses the planning and management aspects of adaptation measures for mitigating the adverse impacts of climate change on economic infrastructure facilities. We navigate through the complexities of risk assessment in the face of climate change uncertainties. The integrated assessment of infrastructure facilities using climate forecast maps and facilities vulnerability maps is structurally described. An approach is proposed to form a portfolio of infrastructure facilities. They are selected in two stages as follows. In the first stage, a preliminary portfolio of facilities is formed using integrated assessment. In the second stage, investment resources are sequentially allocated to preliminary portfolio's facilities in descending order of their specific risk assessment. Due to a limited investment fund, the second stage yields the final portfolio of facilities for implementing adaptation measures. We present an incentive mechanism for adaptation measures under the Principal's incomplete information. This mechanism is optimal and provides reliable data from the facilities to the Principal (possesses strategy-proofness).

Keywords: climate change, adaptation, integrated risk assessment, selection of infrastructure facilities, allocation of investment funds, costs, financing mechanisms, incentives.