

УДК 338.24, 004.89, 004.942

А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник, Ю. С. Попков, В. А. Путилов

Результаты первого этапа реализации проекта по развитию информационных технологий системной оценки рисков социально-экономического развития Арктики

A. V. Masloboev, A. G. Oleynik, Yu. S. Popkov, V. A. Putilov

Project implementation start-up results of information technologies engineering for system risk assessment of Arctic region socio-economic development

Аннотация. Представлены результаты первого года реализации проекта, ориентированного на фундаментальные междисциплинарные исследования в области развития методологии и разработки модельного инструментария и информационных технологий системной оценки рисков нового этапа освоения Арктики (работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-29-06973), используемых при решении комплекса задач информационно-аналитической поддержки управления риск-устойчивым социально-экономическим развитием Арктической зоны России.

Abstract. In this paper the start-up research and work-out results received under Russian Fund for Basic Research project execution № 15-29-06973 have been represented. The project is devoted to interdisciplinary research in the field of methodology, modeling toolkit and information technologies development for system risk assessment of the new stage of Arctic region exploration. The project results are directed to management information and analytical support complex problem-solving of risk-sustainable socio-economic development of the Arctic region of Russian Federation.

Ключевые слова: междисциплинарные исследования, системный анализ, информационные технологии, управление, оценка рисков, социально-экономическое развитие, Арктическая зона РФ.

Key words: interdisciplinary research, system analysis, information technologies, control, risk assessment, socio-economic development, the Arctic region.

Введение

Формирование высокоприоритетного "арктического вектора" государственной политики России стало реакцией на тот факт, что в современных условиях Арктика оказалась в центре внимания многих стран; это создает дополнительные угрозы реализации интересов России на данных территориях. По сути, запущен процесс нового многопланового освоения Арктического региона. Характерно, что основные доводы в пользу императивной целесообразности повышенной арктической активности опираются на сугубо оптимистические прогнозные оценки открывающихся возможностей. При этом явно недооцениваются сопряженные с потенциальными выигрышами не менее существенные многочисленные и разнообразные проблемные риски. Такой перекоп в подходе к обоснованию стратегических государственных решений чреват существенными негативными и, не исключено, непоправимыми последствиями регионального, национального и глобального масштабов. С тем чтобы избежать такого крайне нежелательного развития событий, необходимо с особой тщательностью и взвешенностью обеспечить исчерпывающую идентификацию, систематизацию и адекватную аналитическую оценку наиболее существенных рисков активизации деятельности в Арктике.

Большая часть исследований, связанных с анализом и прогнозированием развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ), базируется на наличии четко поставленных целей и приоритетов макро- и микроэкономического развития, а также предсказуемости результатов исследований. В таких условиях адекватная оценка рисков, сопровождающих освоение арктических территорий, возможна. Однако современная ситуация в Арктике характеризуется активизацией деятельности различных акторов на этой территории и, как следствие, обострением конфликтов их интересов. Это приводит к росту динамичности и неопределенности факторов риска гетерогенных макросистем на указанных территориях.

В данной ситуации необходима разработка методологии анализа рисков освоения арктических территорий с учетом ограниченности информации. К решению этих фундаментальных, но имеющих высокую практическую значимость задач следует подходить, опираясь на методологическую базу системного подхода и организации междисциплинарных исследований. Важную роль при этом играют методы и инструменты информационного мониторинга, системной диагностики и математического моделирования процессов и явлений социально-экономического развития, рассматриваемых в пространственном измерении.

Именно с таких содержательных, методологических и методических позиций предлагается исследовать широкий класс фундаментальных междисциплинарных проблем, связанных с систематизацией, анализом, прогнозированием и оценкой рисков нового освоения Арктики. При этом геополитические, социально-экономические, экологические и климатические риски рассматриваются в тесной взаимосвязи как совокупный риск освоения и развития Арктического региона РФ. Системному анализу указанных проблем и развитию методологии их решения на основе современных информационных технологий и методов моделирования и посвящена настоящая работа.

Современное состояние исследований проблем управления риск-устойчивым развитием АЗ РФ

Комплексные междисциплинарные исследования по развитию методологии, методов моделирования и информационных технологий для системной оценки рисков освоения и развития Арктики до настоящего времени не проводились ни в Российской Федерации, ни за рубежом. Актуальность таких системных исследований обусловлена принятием на государственном уровне стратегических решений по активизации деятельности России в АЗ РФ. В качестве одного из приоритетов определено развитие информационных технологий и связи с целью создания современной информационной инфраструктуры безопасности, как на региональном, так и на международном уровне. В настоящее время для решения задач системного анализа и моделирования безопасности и рисков развития региональных социально-экономических систем используются разнообразные средства, каждое из которых представляет собой обособленный "островок" методов автоматизации и управления. Отечественных и зарубежных разработок, позволяющих комплексно решать проблему оценки рисков, в ходе исследований не выявлено.

В современных исследованиях методологическую схему принятия решений в отношении риска подразделяют на два крупных блока: оценку и/или анализ риска и управление риском. Анализ риска включает в себя идентификацию опасностей и количественную оценку риска. Управление риском подразумевает наработку альтернатив, их сравнительную оценку, обоснованный отбор методов воздействия на объект управления и реализацию выбранных воздействий. Одной из актуальных международных тенденций является переход от концепции реактивного (Safety-I) к концепции про-активного (Safety-II) управления риском [1]. Первый подход подразумевает реагирующую стратегию, фокусировку внимания на неполадках, стремление минимизировать возможный ущерб. Второй подход реализует упреждающую стратегию, концентрацию внимания на нормальном функционировании, стремление максимизировать число "успехов" и решить поставленные задачи.

Особенностями АЗ РФ являются экстремальные природно-климатические условия, очаговый (кластерный) характер освоения территорий, низкая плотность населения, удаленность от основных промышленных центров, высокая ресурсоемкость, зависимость от других регионов России и зарубежных партнеров, уязвимость экологических систем. Исследования Арктики в контексте оценки рисков ее освоения являются сравнительно новым научным направлением, которое находится еще в начальной стадии формирования как самостоятельная сфера фундаментальных научных интересов. Подавляющее большинство исследований, так или иначе затрагивающих проблему оценки рисков освоения Арктики, посвящено вопросам определения изменчивости и предсказуемости глобальной климатической системы, в частности оценкам реакции климата на антропогенное увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере (в том числе выполняемых с помощью сложных физико-математических моделей).

Что касается анализа геополитических и социально-экономических рисков, связанных с освоением Арктического региона России, то они до недавнего времени носили преимущественно бессистемный и инерционный характер. В большей степени это было связано с отсутствием практической востребованности научных разработок в данной области. Важными направлениями исследований Арктики и прилегающих территорий в мировой и отечественной науке были и остаются геологическое изучение и оценка эффективности новых перспективных месторождений, анализ современного состояния и перспектив развития топливно-энергетического, лесного, транспортного секторов, а также инфраструктуры и социальной сферы региона, но без учета комплексного влияния системы рисков. Вместе с тем отсутствие методологии оценки рисков освоения Арктики составляет фундаментальное препятствие не только для разработки конкретных мер по снижению их негативного влияния, но и для совершенствования концептуальных моделей развития Арктического региона на современном этапе. Все это требует усиления внимания ученых к определению и классификации рисков освоения арктического пространства, а также обуславливает необходимость перехода от преимущественно качественных и общих характеристик влияния указанных рисков на хозяйственную деятельность в регионе к их более детальному, в том числе количественному, оценкам.

К настоящему времени накоплен значительный опыт управления безопасностью в различных областях: горное дело, ядерная энергетика, химические технологии и др. Многие исследования в нашей стране и за рубежом посвящены анализу опасностей и рисков для различных уровней иерархии – от объектового до глобального. Тем не менее объектовый и региональный уровни иерархии остаются наименее формализованными. Однако именно крупные объекты (промышленно-природные комплексы, урбанизированные территории) являются основными генераторами промышленно-экологических

и социально-экономических рисков в АЗ РФ. Источники и объекты воздействия потенциальных опасностей разнообразны и многочисленны. Они характеризуются различной степенью изученности с точки зрения оценки и прогнозирования рисков.

В научной литературе и практике в настоящее время только формируется подход, позволяющий комплексно рассматривать и оценивать риски хозяйственного освоения арктического пространства в самом широком их понимании, в системе их взаимосвязи с геополитическими, природно-географическими, климатическими, техногенными, социально-экономическими и экологическими факторами. В отечественных работах [2–6] исследование проблем хозяйственного освоения Арктики основывается, как правило, на приоритете экологических угроз и рисков. При этом упускается целый комплекс неотъемлемых элементов и факторов, влияющих на эффективность решений стратегических вопросов развития Арктики. В современных исследованиях по-прежнему отсутствует увязка потенциальных рисков и угроз с принципами и задачами комплексного подхода к освоению Арктического региона.

Среди работ отечественных и зарубежных ученых, наиболее близких к проблемной области исследования, можно указать [7–10]. В этих работах представлены результаты исследований, направленных на решение частных задач управления безопасностью развития региональных социально-экономических систем на основе методов сценарного анализа и прогнозирования, методов поддержки принятия решений, методов когнитивного и имитационного моделирования. Развивается системный подход к решению проблем обеспечения безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Так, в работе [11] представлен анализ основных угроз развития страны, приведены характеристики территорий федеральных округов, общие параметры различных видов чрезвычайных ситуаций, сделан вывод о необходимости совершенствования объектовых и региональных систем обеспечения комплексной безопасности. В работе [12] предложена технология логико-вероятностного управления рисками развития социально-экономических систем для информационно-аналитической поддержки принятия решений. Технология включает методики количественного анализа, оперативного и стратегического управления риском и восходит к работам основателя научного направления логико-вероятностного моделирования и анализа надежности, безопасности и риска структурно-сложных систем И. А. Рябина [13].

Актуальным направлением в развитии современных информационных технологий является использование мультиагентных систем для решения различных задач управления региональным развитием и безопасностью организационных и технических систем. Этой тематике посвящены работы [14–17].

Методологическая база исследования и используемые технологии

Общеметодологической базой исследования являются системный подход и экономическая теория риска Шумпетера – Найта [18; 19], в рамках которой риски климатических изменений техногенного, социально-экономического и экологического характера рассматриваются как часть совокупного риска потери благ при развитии АЗ РФ. Поэтому исследование проблемы системной оценки рисков освоения Арктики базируется на междисциплинарном подходе с использованием современных методов моделирования, геосистемного, экономического и статистического анализа, экспертных и вероятностных оценок факторов и характеристик различной природы. Создание компьютерных моделей и информационных технологий поддержки управления риск-устойчивым развитием объектов и подсистем АЗ РФ требует формализованного и единообразного описания предметной области. Для создания формализованных концептуальных моделей различных предметных и проблемных областей и компьютерной обработки таких моделей в мировой практике широко используются онтологии [20–22]. Формальный вывод на онтологии применяется для решения различных задач – от оценки целостности концептуальных представлений до выявления новых знаний об исследуемом объекте или процессе. Концептуальное моделирование призвано обеспечить не только структуризацию мультидисциплинарных знаний об источниках и факторах рисков, связанных с деятельностью в АЗ РФ, но и автоматизацию процессов синтеза спецификаций структуры вариантов решения задач оценки рисков, а также определения комплекса информационных источников, содержащих необходимые для формирования решения данные. Для синтеза и анализа целостного формализованного представления мультидисциплинарных знаний и ассоциированных с ними информационных ресурсов по типовым опасностям, характерным для объектов и территорий АЗ РФ, использована модифицированная технология концептуального моделирования [23]. Процедуры анализа формализованной концептуальной модели позволят проводить оценку полноты и непротиворечивости (целостности) представляемой в модели информации. В случае невозможности априорного согласования включаемых в модель знаний структура модели позволяет корректно представлять и обрабатывать альтернативы.

Широкое применение в различных областях, требующих решения сложных распределенных задач, в том числе создание гибких систем распределенной обработки информации, находят мультиагентные технологии. Использование технологий одноранговых и мультиагентных систем, построенных на базе сервис-ориентированной архитектуры, позволит создать адекватную среду информационного обеспечения задач мониторинга, оценки и прогнозирования рисков. Принцип агентной ориентации заключается

в использовании в качестве компонентов распределенных информационных систем интеллектуальных агентов, автономно функционирующих и обладающих целенаправленным поведением. На интеллектуальных агентов могут быть возложены функции информационного мониторинга за состоянием различных показателей региональной безопасности (факторов риска), а также инициирования процедур пересчета прогнозных оценок "глобальных" рисков в связи с критическими изменениями контролируемых факторов. Источником информации для поиска и сбора агентами необходимых данных в распределенной информационной среде служат спецификации решаемых задач, синтезируемые на основе созданной концептуальной модели. В рамках представляемого исследования технология одноранговых мультиагентных систем используется при решении задач оперативного сбора, обработки и анализа больших объемов разноплановой информации о разнородных факторах, определяющих риски, связанные как с отдельными объектами, так и с подсистемами АЗ РФ.

С точки зрения поддержки управления риск-устойчивым развитием АЗ РФ основной функцией моделирования является прогностическая. В математическом моделировании наиболее близкой к проблемной области исследования является современная технология прогнозирования, которая складывается в последовательность из трех этапов:

- 1) построение модели процесса и ее "обучение" на пакетах ретроспективных входных и выходных данных;
- 2) тестирование "обученной" модели на ретроспективных данных, не использованных на этапе обучения;
- 3) построение прогнозных траекторий процесса при положительных результатах тестирования.

Наиболее важным является первый этап. Под обучением модели понимается определение оптимальных параметров модели по имеющимся входным и выходным данным. Для решения указанной задачи используются различные классы моделей (регрессионные, дифференциальные уравнения, функциональные полиномы и др.), содержащие неизвестные параметры и критерии оценки этих параметров (интегральные, квантильные, вероятностные). Задача оценивания сводится к той или иной форме задачи минимизации принятого критерия на некотором допустимом множестве, для решения которой привлекаются известные или разрабатываются новые численные методы. Поскольку пакеты входных и выходных данных рассматриваются как случайные объекты, да к тому же содержащие случайные ошибки, то и получаемые оценки являются случайными. Математическая статистика предлагает методы исследования вероятностных свойств этих оценок (состоятельности, эффективности). Указанные методы основываются на некоторых гипотезах о свойствах исходных пакетов данных. В частности, они являются выборками из генеральной совокупности и при этом нормально распределены. При малых объемах данных корректная проверка этих гипотез практически невозможна. Поэтому вероятностное прогнозирование исследуемого процесса, использующее "традиционные" статистические методы, оказывается ненадежным даже на коротких интервалах времени, так как не обеспечивает получение достоверных оценок.

Альтернативным решением задачи прогнозирования является применение рандомизированного прогнозирования, при котором генерируется не одна оптимальная траектория, а "оптимальный" ансамбль прогнозных траекторий. Для определения оптимальных характеристик рандомизированных моделей разработан метод энтропийно-робастного оценивания [24], использующий небольшое количество данных об исследуемом объекте. Оптимальность вероятностных характеристик рандомизированной модели понимается в терминах максимизации энтропии. Такой подход позволяет преодолеть недостатки классических методов прогнозирования. С учетом особенностей объекта исследований метод энтропийно-робастного оценивания рассматривается как ключевой метод проекта, обеспечивающий получение новых научных результатов.

Для сравнительного анализа разнородных рисков использованы методы многокритериального оценивания, а для выявления относительно небольшого числа (3–7) определяющих факторов, называемых в синергетике "параметрами порядка", – методы свертки факторного пространства.

Результаты и их обсуждение

На основе сравнительно-исторического анализа российских и международных исследований обобщены концептуальные подходы к освоению российской Арктики [25]. Идентифицированы, систематизированы и уточнены основные риск-образующие факторы, связанные с хозяйственным освоением Арктического региона. Состав идентифицированных в ходе исследования рисков свидетельствует о междисциплинарности проблемы их научного исследования. Установлено, что границы между отдельными группами рисков и степень их влияния весьма условны. Наиболее значимым с точки зрения междисциплинарных исследований является определение геополитических, природно-географических, экологических, техногенных и климатических рисков, а также оценка их влияния на экономику и социальную сферу Арктического региона. Для этого необходима тесная связь экономической науки с методологией и прикладным инструментарием климатологии, географии, экологии, политологии,

рационального природопользования и ряда технических наук. Междисциплинарный характер полученных результатов обусловлен тем, что каждый из риск-факторов может, во-первых, выступать самостоятельным объектом исследования в перечисленных отраслях науки, а во-вторых, оказывать значительное влияние на другие риски и быть подверженным обратному их влиянию в зависимости от целого ряда объективных и субъективных причин. В рамках принципиальных подходов к освоению Арктики определено влияние риск-образующих факторов на формирование трендов социально-экономического развития регионов. С учетом актуальных задач комплексного освоения АЗ РФ определена роль кластерной модели развития промышленных регионов. Доказано, что система кластеров способствует широкому вовлечению северных территорий в хозяйственный оборот, росту численности постоянно проживающего населения, созданию современной инфраструктуры (в том числе с использованием инновационных ресурс- и природосберегающих технологий в строительстве, энергетике, транспорте и других видах экономической деятельности). В сочетании с эффективными мерами государственной поддержки кластерная модель способна придать гибкость управлению инновационными процессами в условиях внутриэкономических и геополитических вызовов, а в конечном итоге способствовать снижению и парированию региональных противоречий и рисков.

Выполнена постановка задачи обеспечения безопасности развития АЗ РФ, сформирована система основных понятий предметной области и проведена классификация основных опасностей. Обосновано применение при моделировании известного в теории безопасности принципа приемлемого риска. Приемлемым считается достижимый и оправданный (допустимый) с точки зрения социально-экономических и экологических факторов риск, с которым общество готово мириться ради получения определенных положительных результатов своей деятельности в настоящем и будущем. Величина приемлемого риска определяется достигнутым уровнем знаний, социально-экономическими возможностями государства, общественным мнением, а также региональными особенностями. Обоснование уровня приемлемого риска развития региона является самостоятельной научной задачей.

Разработан метод единого формализованного представления состава объектов и субъектов, участвующих в процессах управления риск-устойчивым развитием АЗ РФ, и отношений между ними. Формализованное представление реализовано в виде концептуальной модели мультидисциплинарных знаний и ассоциированных с ними информационных ресурсов об угрозах и рисках, характерных для объектов и территорий АЗ РФ. Модель обеспечивает возможность количественного анализа факторов риска и прогнозирования моделирования с целью генерации и анализа сценариев управления риск-устойчивым развитием АЗ РФ в условиях разнородных кризисных ситуаций.

Для АЗ РФ определены и классифицированы основные возможные проявления техногенных опасностей и основные угрозы экологического характера. Определены типовые структуры данных, относящихся к различным видам опасных процессов и объектов. Выполнено формальное описание предметной области на основе теоретико-множественного подхода. Предложена методика структуризации и обработки экспертных знаний, ориентированная на формирование базовой модели опасностей. В составе промышленно-природно-социальной системы выделяются источники и объекты воздействия (приемники) опасностей. Объединение множеств источников и приемников образует несущее множество опасностей, на котором определяется множество упорядоченных пар "источник – приемник". Таким образом задается отношение, называемое отношением опасности. Несущее множество с заданным на нем отношением опасности представляет собой базовую (исходную) модель опасностей, элементы и отношения в ней на данном этапе полагаются однородными. Выделены типовые элементы и структуры, имеющие содержательный смысл. Предложены показатели для оценки опасности как отдельных объектов (элементов модели), так и регионального промышленно-природного комплекса АЗ РФ в целом. Создана методика построения дискретных моделей потенциальных опасностей, предложены показатели оценки опасности. Методика позволяет формировать наглядные графические и матричные модели опасностей для различных вариантов изученности предметной области, а также выполнять экспресс-анализ риска. Предложенные подходы апробированы на примере задачи информационной поддержки защищенности типовых критически важных объектов АЗ РФ от угроз техногенного, природного характера и террористических актов. Разработана структура, принципы организации, ведения и формирования поисковых запросов интегрированной справочной системы для представления информации о разнопрофильных исследованиях и научно-практических разработках, связанных с деятельностью в АЗ РФ.

Разработана технология синтеза рациональных структур информационного обеспечения для управления безопасностью развития типовых промышленно-природных арктических кластеров. Технология позволяет для различных сценариев развития регионов оптимизировать структуру и состав разнородной взаимосвязанной информации (законодательно-справочной, технологической, риск-аналитической), необходимой для оценки потенциальных рисков. Особенности технологии являются структурная декомпозиция и последующий синтез критериев и требований безопасности для типовых классов объектов и направлений регулирования. Технология апробирована в ходе анализа риска ряда промышленно-природных комплексов Мурманской области.

На примере управления региональной безопасностью разработана технология агрегирования слабо структурированной проблемно-ориентированной информации. Особенностью технологии является применение модифицируемых структур (шаблонов), что обеспечивает автоматизацию конструирования концептуальной модели предметной области. Технология способствует формированию единого информационного поля для принятия решений, а также выработке рекомендаций по согласованным структурам управления для типовых региональных чрезвычайных и кризисных ситуаций.

Разработана исследовательская модель прогнозирования риск-устойчивого развития арктических регионов на основе оригинальной системы показателей, характеризующих состояние элементов и подсистем АЗ РФ. В результате анализа матрицы показателей региональной безопасности определяется индикаторная оценка рисков при различных сценариях развития региона на основе экспертно-имитационного моделирования. Предложенная система показателей создана в результате обобщения существующих индикаторных систем и формирования интегральных показателей путем свертки ряда групп общепринятых индикаторов безопасности. Это, с одной стороны, позволяет сократить размерность модели, а с другой стороны, повышает "системность" используемых показателей. Вопросам разработки систем показателей, объективно отражающих уровень угроз кризисных явлений в регионе, посвящены, например, работы [26; 27]. Имитационное моделирование динамики показателей обеспечивает получение как интегральной оценки безопасности региона, так и отдельных ее составляющих.

Для мониторинга показателей угроз региональной безопасности в режиме реального времени разработана мультиагентная технология, обеспечивающая информационную поддержку анализа и синтеза сценариев управления риск-устойчивым развитием региональных социально-экономических систем АЗ РФ. В технологии используются созданные формализованные модели жизненного цикла угроз региональной безопасности и интеллектуальные агенты для сбора и обработки информации о влиянии изменяющихся угроз на состояние региональных систем. Технология обеспечивает автоматизированное формирование матрицы показателей региональной безопасности и прогнозирование динамики показателей в режиме реального времени.

В контексте развиваемого рискологического подхода проведен анализ проблем Северного морского пути (СМП) в условиях неопределенности и риска, а также дана оценка значения морского страхования в системе обеспечения безопасности транспортных операций. Показано специфическое значение для устойчивого социально-экономического развития арктических регионов транспортных систем как важнейшего фактора пространственной интеграции территории и акватории, крайнего положения региона, наличия непосредственного выхода к морям Северного Ледовитого океана. Показано также, что намечаемая активизация использования СМП сопряжена с ростом рисков. Минимизация рисков, обеспечение безопасности в суровых природно-климатических условиях и сохранение природной среды при транспортировке по арктической морской магистрали требуют решения ряда проблем: внедрения инноваций, направленных на создание высокотехнологичного оборудования, технологий, инженерных методов и на модернизацию производственной базы; применения превентивных мероприятий законодательного характера; использования страховой защиты в качестве эффективного метода обеспечения безопасности мореплавания, экономической безопасности, а также инструмента снижения рисков негативных последствий морских катастроф и аварий. С учетом особенностей судоходства по СМП проведен анализ причинно-следственных связей, установлены риск-образующие факторы и риски. Наряду с характерными для большинства видов деятельности в АЗ РФ природно-климатическими и экологическими рисками, выделены риски имущественного и экономического характера. Важным фактором риска является компетенция экипажа в условиях ледовой эксплуатации судна. Дан детальный анализ объектов морского страхования (страхование "каско"; страхование "карго"; страхование ответственности перевозчика) в арктических условиях.

Разработан метод рандомизированного прогнозирования с использованием энтропийно-робстного оценивания. При построении моделей для анализа возможных рисков освоения арктического региона наиболее эффективной является распространенная концепция стохастических моделей, в которых параметры и/или переменные полагаются случайными величинами. Случайные параметры модели отражают вероятностную природу потенциально возникающих рисков и в то же время определяют математический аппарат анализа результатов моделирования. Под оцениванием модели понимается задача выявления оптимальных вероятностных характеристик, например распределение вероятностей (для дискретных случайных величин) и функций плотности распределения вероятностей (для непрерывных). Концепция энтропийно-робстного оценивания базируется на использовании метода максимизации энтропии для определения энтропийно-оптимальных характеристик случайных величин. Такой метод оценивания имеет преимущества при исследовании систем малоизученной области, когда традиционные методы оценивания стохастических параметров оказываются неприменимыми в силу недостатка входных данных.

Исследование Арктического региона характеризуется отсутствием возможности указания достоверной информации относительно вида уравнений, описывающих систему, а также характеристик

свойственных данной системе ошибок измерений, качества известной об объекте информации, которая служит ретроспективными данными при построении модели. Именно в таких условиях концепция энтропийно-робастного оценивания и рандомизированного прогнозирования оказывается наиболее эффективной. Метод энтропийно-робастного оценивания не использует никакой дополнительной информации об исследуемом объекте, кроме вида описывающих его уравнений и, при наличии, интервалов возможных значений искомых параметров. Преимущество энтропийного оценивания следует из определения энтропии как традиционной меры неопределенности, непременно сопровождающей процесс любого прогнозирования. Максимизация энтропии при дополнительных балансовых ограничениях позволяет получить наилучшие с точки зрения вероятности характеристики искомых параметров при наихудших условиях в части возникающих шумов, интерпретируемых в качестве рисков. Полученные таким образом оценки обладают свойством робастности, благодаря чему могут быть использованы для построения прогнозов риск-устойчивого развития.

Рандомизированная модель данных (РМД) задается матричным уравнением, включающим вектор измерений, матрицу входных данных, вектор параметров модели, а также компоненты, имитирующие ошибки измерений. В случае непрерывных случайных величин характеристиками модели являются функции плотности распределения вероятностей (ПРВ) всех входящих в нее параметров. Функции ПРВ оцениваются с использованием измерений "входа" и "выхода" на интервале ретроспективных данных. Задача максимизации энтропии формулируется в терминах обобщенного энтропийного функционала Больцмана, являющегося аналогом функционала правдоподобия с точностью до знака. Экстремальная задача решается в условиях ограничений на класс функций ПРВ и на баланс между выходом модели и измерениями с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа и производных Гаусса. Задача оценивания сводится к численному решению системы нелинейных интегральных уравнений, аналитическая разрешимость которой не представляется возможной.

В ходе исследований показана эффективность метода максимизации энтропии при построении линейных регрессионных моделей в условиях неструктурированного шума в сравнении с наиболее распространенными инструментами эконометрического анализа: методом наименьших квадратов, методом максимума правдоподобия и методом Байеса. Полученные в ходе оценивания энтропийно-оптимальные характеристики используются для построения ансамбля траекторий развития системы, каждая из которых соответствует конкретной реализации случайных величин, входящих в математическую модель системы, и является одной из возможных, с учетом начальных ограничений, траекторий развития. Такая техника получила название "рандомизированное прогнозирование", удачно отражающее стохастические свойства модели. Созданный метод рандомизированного прогнозирования с использованием энтропийно-робастного оценивания был протестирован на примере простой модели, описываемой линейным дифференциальным уравнением первого порядка.

Заключение

В ходе исследования получены следующие основные результаты.

На основе компаративного анализа исследований АЗ РФ определены, систематизированы и уточнены основные риск-образующие факторы, связанные с хозяйственным освоением АЗ РФ. Выявлено их влияние на формирование трендов социально-экономического развития регионов. Состав идентифицированных рисков свидетельствует о междисциплинарности проблемы их научного исследования. Каждый из риск-факторов может выступать самостоятельным объектом исследования в рамках "собственной" отрасли науки, а также оказывать значительное влияние на другие риски и быть подверженным обратному их влиянию. Результаты и выводы компаративного анализа исследований АЗ РФ в целом согласуются с данными новейших отечественных и зарубежных исследований 2014–2015 гг., в частности с исследованиями в рамках международного проекта ААСА (Adaptation Actions for a Changing Arctic, Part C)¹, а также выводами Пятого оценочного доклада МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата)² в части оценок воздействия климатических изменений на состояние экологической среды и перспективы социально-экономического развития Арктики.

Определена роль кластерной модели развития АЗ РФ. Доказано, что система кластеров способствует широкому вовлечению северных территорий в хозяйственный оборот, росту численности постоянно проживающего населения, созданию современной инфраструктуры.

Разработана формальная концептуальная модель междисциплинарных знаний и данных об угрозах и рисках, характерных для объектов и подсистем АЗ РФ. В рамках модели формализованы отношения (связи) между понятиями предметной области и ассоциированными с ними источниками фактографических данных.

¹ Adaptation Actions for a Changing Arctic-Part C (ААСА, 2013–2017 гг.) : международный проект. URL: <http://www.amap.no/adaptation-actions-for-a-changing-arctic-part-c>.

² Пятый оценочный доклад МГЭИК. URL: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_russian.shtml.

Определены методика построения дискретных моделей потенциальных угроз и опасностей критически важным объектам, локализованным на территории АЗ РФ, и технология синтеза рациональных структур информационного обеспечения для управления региональной безопасностью.

Разработана технология рандомизированного прогнозирования для оценки рисков освоения арктических территорий с использованием энтропийно-оптимальных оценок при ограниченном количестве данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №15-29-06973-офи-м).

Библиографический список

1. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management. Ashgate, England, 2014. 187 p.
2. Артюхин О. А., Крицкая А. А. Экополитологическая рискогенность национальной безопасности России // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2015. № 8 (63). С. 54–56.
3. Медведева О. Е. Задачи оценки экологического ущерба в Арктической зоне // Арктика и Север. 2015. № 18. С. 131–147.
4. Башкин В. Н., Трубицина О. П., Припутина И. В. Оценка геоэкологических рисков в зонах влияния предприятий нефтегазовой промышленности в российской Арктике // Арктика и Север. 2015. № 20. С. 92–98.
5. Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Геоэкологическое состояние среды морей российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2 (21). С. 82–93.
6. Молчанов В. П., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации. М. : ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России, 2011. 300 с.
7. Blinc R., Zidans'ek A., Slaus I. Sustainable development and global security // Proceedings of the Third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Energy, June 2007. V. 32, Iss. 6. P. 883–890.
8. DeTombe D. J. Global Safety // Pesquisa Operacional. 2010. V. 30, N 2. P. 387–404.
9. Zgurovsky M. Global simulation of quality and security of human life // Romanian Journal of Economic Forecasting. 2009. N 3. P. 5–21.
10. Сценарный анализ в управлении информационной поддержкой процессов предупреждения и урегулирования конфликтных ситуаций в Арктике / В. В. Кульба, В. Л. Шульц, А. Б. Шелков, И. В. Чернов // Национальная безопасность. 2013. № 1. С. 62–152.
11. Добровольский В. С. Проблемы и особенности обеспечения безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций объектов экономики // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1. С. 87–98.
12. Соложенцев Е. Д. Логико-вероятностное управление риском состояния и развития социально-экономических систем и процессов // Проблемы анализа риска. 2015. Т. 12, № 1. С. 6–16.
13. Рябинин И. А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб. : Политехника, 2000. 248 с.
14. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Агентно-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3 (288). С. 2–11.
15. Маслобоев А. В. Мультиагентная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью "Безопасный Виртуальный Регион" // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 128–138.
16. Копелиович Д. И., Юркова О. Н. Принципы построения автоматизированных систем мониторинга социально-экономических объектов // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер. "Управление, вычислительная техника и информатика". 2015. № 1. С. 98–104.
17. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Алексеев А. А. Подходы к моделированию функционирования специализированных многоагентных систем // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1 (1). С. 39–47.
18. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М. : Эксмо, 2007. 864 с.
19. Найт Ф. Х. Риск, неопределенность и прибыль : пер. с англ. М. : Дело, 2003. 360 с.
20. Загоруйко Ю. А. Семантическая технология разработки интеллектуальных систем, ориентированная на экспертов предметной области // Онтология проектирования. 2015. Т. 5, № 1 (15). С. 30–36.
21. Ломов П. А. Применение паттернов онтологического проектирования для создания и использования онтологии в рамках интегрированного пространства знаний // Онтология проектирования. 2015. Т. 5, № 2 (16). С. 233–245.

22. Коварцев А. Н., Смирнов В. С., Смирнов С. В. Рациональное проектирование модели, описывающей структуру классов объектов, на основе онтологического анализа данных // Труды Института системного программирования РАН. 2015. Т. 27. Вып. 3. С. 73–86.

23. Олейник А. Г., Путилов В. А. Развитие технологии концептуального моделирования, основанной на функционально-целевом подходе // История науки и техники. 2014. № 1. С. 37–52.

24. Попков Ю. С., Попков А. Ю., Лысак Ю. Н. Оценка характеристик рандомизированных динамических моделей данных (энтропийно-робастный подход) // Автоматика и телемеханика. 2014. № 5. С. 83–90.

25. Швецов А., Наумова Ю., Воронина Е. Системная оценка рисков нового этапа освоения российской Арктики: концептуальные основы // Проблемы теории и практики управления. 2015. № 11. С. 49–55.

26. Халиуллина Д. Н., Малыгина С. Н. Основные аспекты комплексной безопасности региона // Труды КНЦ РАН. Информационные технологии. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2015. Вып. 6. С. 111–114.

27. Иванова М. В., Жаров В. С. Условия, факторы и угрозы функционирования био-социо-экономической системы Арктической зоны Российской Федерации // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 3. С. 272–277.

References

1. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management. Ashgate, England, 2014. 187 p.

2. Artyuhin O. A., Kritskaya A. A. Ekopolitologicheskaya riskogennost natsionalnoy bezopasnosti Rossii [National security ecopolitical risk-gene of Russia] // Nauka i obrazovanie: hozyaystvo i ekonomika; predprinimatelstvo; pravo i upravlenie. 2015. N 8 (63). P. 54–56.

3. Medvedeva O. E. Zadachi otsenki ekologicheskogo uscherba v Arkticheskoy zone [The tasks of the assessment of environmental damage in the Arctic] // Arktika i Sever. 2015. N 18. P. 131–147.

4. Bashkin V. N., Trubitsina O. P., Pripulina I. V. Otsenka geoekologicheskikh riskov v zonah vliyaniya predpriyatii neftegazovoy promyshlennosti v rossiyskoy Arktike [Evaluation of geo-environmental risks in the influence zones of oil and gas industry in the Russian Arctic] // Arktika i Sever. 2015. N 20. P. 92–98.

5. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Geoekologicheskoe sostoyanie sredy morey rossiyskogo sektora Arktiki v usloviyah sovremennykh tehnogennykh nagruzok [Geoecological state of seas environment in the russian Arctic under the present technogenic stresses] // Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. N 2 (21). P. 82–93.

6. Molchanov V. P., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Riski chrezvychaynykh situatsiy v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii [Emergency situation risks in Arctic zone of Russian Federation]. M. : VNII GOChS (FTs) MChS Rossii, 2011. 300 p.

7. Blinc R., Zidans'ek A., Slaus I. Sustainable development and global security // Proceedings of the Third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Energy, June 2007. V. 32, Iss. 6. P. 883–890.

8. DeTombe D. J. Global Safety // Pesquisa Operacional. 2010. V. 30, N 2. P. 387–404.

9. Zgurovsky M. Global simulation of quality and security of human life // Romanian Journal of Economic Forecasting. 2009. N 3. P. 5–21.

10. Stsenarnyi analiz v upravlenii informatsionnoy podderzhkoy protsessov preduprezhdeniya i uregulirovaniya konfliktnykh situatsiy v Arktike [Use of scenario-based analysis in prevention and settlement process management information support of conflict situations in the Arctic] / V. V. Kulba, V. L. Shults, A. B. Shelkov, I. V. Chernov // Natsionalnaya bezopasnost. 2013. N 1. P. 62–152.

11. Dobrovolskiy B. C. Problemy i osobennosti obespecheniya bezopasnosti i zaschity ot chrezvychaynykh situatsiy ob'ektov ekonomiki [On some issues and features for security and protection from emergency situations of economic facilities] // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2015. N 1. P. 87–98.

12. Solozhentsev E. D. Logiko-veroyatnostnoe upravlenie riskom sostoyaniya i razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh sistem i protsessov [Risk logical-and-probabilistic control of socio-economic systems and processes state and development] // Problemy analiza riska. 2015. V. 12, N 1. P. 6–16.

13. Ryabinin I. A. Nadezhnost i bezopasnost slozhnykh system [Reliability and safety of complex systems]. SPb. : Politehnika, 2000. 248 p.

14. Makarov V. L., Bahtizin A. R., Sushko E. D. Agentno-orientirovannaya sotsio-ekologo-ekonomicheskaya model regiona [An agent-oriented social-ecological-economic model of a region] // Natsionalnye interesy: priorityety i bezopasnost. 2015. N 3 (288). P. 2–11.

15. Masloboev A. V. Multiagentnaya informatsionno-analiticheskaya sreda podderzhki upravleniya regionalnoy bezopasnostyu "Bezopasnyi Virtualnyi Region" [Multi-agent information and analytical system "Secured Virtual Region" for regional security management support] // Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tehnologiy, mehaniki i optiki. 2013. N 4 (86). P. 128–138.

16. Kopeliovich D. I., Yurkova O. N. Printsipy postroeniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa sotsialno-ekonomicheskikh ob'ektov [Principles of designing the automated systems of monitoring the social and economical objects] // Vestnik Astrahanskogo gos. tehn. un-ta. Ser. "Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika". 2015. N 1. P. 98–104.
17. Babich M. Yu., Kuznetsov V. E., Alekseev A. A. Podhody k modelirovaniyu funktsionirovaniya spetsializirovannykh mnogoagentnykh sistem [Approaches to specialized multi-agent systems functioning modeling] // Voprosy radioelektroniki. 2015. N 1 (1). P. 39–47.
18. Shumpeter Y. Teoriya ekonomicheskogo razvitiya [Theory of economic development]. M. : Eksmo, 2007. 864 p.
19. Nayt F. H. Risk, neopredelennost i pribyl [Risk, uncertainty, benefit] : per. s angl. M. : Delo, 2003. 360 p.
20. Zagorul'ko Yu. A. Semanticheskaya tekhnologiya razrabotki intellektualnykh sistem, orientirovannaya na ekspertov predmetnoy oblasti [Semantic technology for development of intelligent systems oriented to experts in subject domain] // Ontologiya proektirovaniya. 2015. V. 5, N 1 (15). P. 30–36.
21. Lomov P. A. Primenenie patternov ontologicheskogo proektirovaniya dlya sozdaniya i ispolzovaniya ontologii v ramkah integrirovannogo prostranstva znaniy [Application of ontology design patterns to development and use of ontologies in an integrated knowledge space] // Ontologiya proektirovaniya. 2015. V. 5, N 2 (16). P. 233–245.
22. Kovartsev A. N., Smirnov B. C., Smirnov S. V. Ratsionalnoe proektirovanie modeli, opisyyvayushey strukturu klassov ob'ektov, na osnove ontologicheskogo analiza dannykh [Intelligent design of class structure model based on ontological data analysis] // Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN. 2015. V. 27. Vyp. 3. P. 73–86.
23. Oleynik A. G., Putilov V. A. Razvitie tekhnologii kontseptualnogo modelirovaniya, osnovannoy na funktsionalno-tselevom podhode [Development of the conceptual modeling technology based on the functional-goal approach] // Istoriya nauki i tekhniki. 2014. N 1. P. 37–52.
24. Popkov Yu. S., Popkov A. Yu., Lysak Yu. N. Otsenivanie harakteristik randomizirovannykh dinamicheskikh modeley dannykh (entropiyno-robastnyi podhod) [Estimating the characteristics of randomized dynamic data models (the Entropy-Robust Approach)] // Avtomatika i telemekhanika. 2014. N 5. P. 83–90.
25. Shvetsov A., Naumova Yu., Voronina E. Sistemnaya otsenka riskov novogo etapa osvoeniya rossiyskoy Arktiki: kontseptualnye osnovy [Risk system assessment of the new stage of Russian Arctic exploration: conceptual foundations] // Problemy teorii i praktiki upravleniya. 2015. N 11. P. 49–55.
26. Haliullina D. N., Malygina S. N. Osnovnye aspekty kompleksnoy bezopasnosti regiona [Basic aspects of region complex security] // Trudy KNTs RAN. Informatsionnye tekhnologii. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 2015. Vyp. 6. P. 111–114.
27. Ivanova M. V., Zharov B. C. Usloviya, faktory i ugrozy funktsionirovaniya bio-sotsio-ekonomicheskoy sistemy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Terms, factors and threats of functioning of the bio-socio-economic system of the Arctic zone of the Russian Federation] // Vestnik MGTU. 2015. V. 18, N 3. P. 272–277.

Сведения об авторах

Маслобоев Андрей Владимирович – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: masloboev@iimm.ru

Masloboev A. V. – Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Senior Research Fellow; e-mail: masloboev@iimm.ru

Олейник Андрей Григорьевич – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, д-р техн. наук, зам. директора; e-mail: oleynik@iimm.ru

Oleynik A. G. – Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Deputy Director; e-mail: oleynik@iimm.ru

Попков Юрий Соломонович – Институт системного анализа Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" РАН, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, директор; e-mail: popkov@isa.ru

Popkov Yu. S. – Institute for System Analysis of Federal Research Centre "Computer Science and Control" RAS, Dr of Tech. Sci., Corresponding Member of RAS, Director; e-mail: popkov@isa.ru

Пutilov Владимир Александрович – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, д-р техн. наук, профессор, директор; e-mail: putilov@iimm.ru

Putilov V. A. – Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Professor, Director; e-mail: putilov@iimm.ru