

**К вопросу анализа устойчивости развития территорий,  
имитационное моделирование**

**Аннотация:** В работе рассматривается композиция методов когнитивного имитационного моделирования и метода принятия решений в условиях вероятностной неопределенности (метод оптимума номинала). Приведены кратко сведения о методе оптимума номинала, разработанного для нахождения оптимальных решений по критерию оптимизации математического ожидания при управлении технологическими процессами. Теоретические положения были применены для исследования устойчивого развития территорий, в том числе, территорий Южного федерального округа РФ. Приведена часть результатов исследования, иллюстрирующих применение композиции методов.

**Ключевые слова:** территория, развитие, устойчивость, критерии, полезность, композиция, оптимум номинала, когнитивное моделирование, принятие решений

**Введение**

Проблемам устойчивого развития сложных систем (социально-экономических, социотехнических, экологических, политических и др.) к настоящему времени посвящено большое количество теоретических и практических исследований. В энциклопедической монографии [1] представлены основные результаты исследований в период с середины до конца 20 века, которые не потеряли остроты актуальности и в настоящее время. Об этом можно судить хотя бы по материалам [2], которые также используются в процессе исследования устойчивого развития территорий Южного Федерального округа. В работе дана постановка задачи исследования и часть результатов, иллюстрирующих использование подхода к оценке полезности результатов достижения устойчивого развития территории. Подход основан на использовании моделей оптимума номинала [3] для принятия решений в условиях

вероятностной неопределенности (задачи с риском) и когнитивного имитационного моделирования [4-5].

### **Постановка задачи**

Анализ устойчивости развития территорий и принятие решений, когда и какой величины должны быть управляющие воздействия для обеспечения устойчивости развития, требует определения, какие показатели, факторы, индикаторы, критерии устойчивости и управляющие воздействия должны быть использованы. Существуют разные формулировки понятия «устойчивое развитие» для сложных систем, к которым относятся и территории. В проведенном исследовании учитывались определения, данные в [1]. Устойчивость понимается как «сложное динамическое свойство класса управляемости», характеризующееся критериями:

- 1) попадание траектории развития системы за определенное время в целевое множество состояний,
- 2) не выход траектории развития на прогнозируемом интервале из некоторого множества безопасных состояний,
- 3) почти монотонное возрастание некоторых показателей развития на определенном интервале времени с последующим сохранением их в заданных интервалах допустимых значений,
- 4) асимптотическая устойчивость (стабилизируемость) программной траектории,
- 5) гармонизация интересов сторон.

Устойчивое развитие возможно при равновесии трех основных составляющих: экономика, общество, окружающая среда [1-2], для характеристики устойчивости которых используются названные критерии 1-5.

Естественно, для разработки стратегий устойчивого развития необходимы предварительные исследования возможностей развития изучаемой территории. Информационной базой для этого являются теоретические, статистические, экспертные данные о территории, а также данные когнитивного имитационного моделирования сценариев ее развития [4-7] с учетом возмущений внешней и внутренней среды.

Как известно, результаты сценарного моделирования на графовых когнитивных моделях [6] представляют собой наборы

импульсных процессов, тенденции развития которых могут удовлетворять или нет названным критериям устойчивости. В многочисленных исследованиях устойчивости указываются для конкретных территорий соответствующие значения показателей, например [1-2]. Выход за пределы допуска по используемым критериям – это зона риска, которая может оцениваться как функция потерь или «отрицательная» полезность. В нашем исследовании предложено использовать модели задач об оптимуме номинала [3] для оценки полезности (эффективности) функционирования системы и выбора лучших стратегий управления ею в условиях вероятностной неопределенности (задачи с риском).

В задачах об оптимуме номинала, сформулированных Д.В. Свечарником (40-е года 20 столетия), предложены различные варианты математических моделей этих задач, которые были развиты позднее [8].

Смысл названия «оптимум номинала» можно понять по первоначальному приложению этой теории к решению производственных задач. Выпускаемая продукция должна соответствовать качеству, задаваемому ее номиналом и границами допуска на номинал «в плюс» и «в минус». Управление технологическим процессом должно быть таким, чтобы на многих реализациях в среднем достигался оптимум номинала с учетом различной «цены» брака и годной продукции – критерий максимизации математического ожидания функции эффективности (полезности).

Модель задачи об оптимуме номинала в случае одного показателя качества  $Y$  имеет вид:

$$\varphi(\alpha) = \varphi(y)_\alpha = \sum_{i=1}^S c_i P_i = \sum_{i=1}^S c_i \int_{Y_{iH}}^{Y_{iB}} f(y)_\alpha dy, \quad (1)$$

$$\varphi^0(\alpha^0) = \max_{m_y} \left\{ \sum_{i=1}^S c_i \int_{y_{iH}}^{y_{iB}} f(y, m_y)_\alpha dy \right\}$$

где  $\varphi(y)_\alpha$  – функция эффективности оптимума номинала – математическое ожидание полезности;

$c_i$  – функция полезности результатов  $y_i$ ,  $p_i$  – вероятность попадания в  $i$ -й интервал  $[Y_{in}, Y_{iv}]$ ;

$f(y)_\alpha$  – плотность распределения результатов  $y$ , соответствующая определенной стратегии  $\alpha$ ,  $Y_{iH}$  и  $Y_{iB}$  – соответственно нижняя и верхняя границы  $i$ - интервала значений  $y_i$ .

Математическое ожидание показателя  $Y$  при неоднократной реализации технологического процесса совпадает с заданным номиналом в случае симметричной функции цены (полезности) и симметричного поля допуска (решение задачи оптимизации тривиально); в случае асимметрии необходим поиск «оптимума номинала», учитывающего разные риски от выхода за границы допуска на номинал «в плюс» и «в минус» и разные значения асимметричной функции полезности внутри поля допуска.  $\varphi^o(\alpha^o)$  – максимальное значение функции эффективности при определении оптимальной стратегии.

Таким образом, модель (1) отражает зависимость ожидаемого эффекта от управления объектом – выбираемой стратегии  $\alpha$ , ведущей к изменениям параметров распределения  $f(y)_\alpha$ , например, математического ожидания (задача оптимума номинала первого класса), дисперсии и других параметров распределения значений показателя  $Y$  (задача оптимума номинала второго класса). «Управление» параметрами распределения представляет собою активное вмешательство в процесс. Правилom выбора оптимального решения (стратегии) является правило максимизации (минимизации)  $\varphi(\alpha)$ . Как известно, в теории принятия решений принцип максимизации (минимизации) целевой функции (математического ожидания полезности) полагается принципом принятия рациональных решений.

Рисунок 1 иллюстрирует задачу оптимизации по математическому ожиданию  $m_y$  одного показателя. Определяется оптимальный сдвиг  $\Delta y_{o\text{ opt}}$  от номинального значения. Это однокритериальная задача оптимума номинала первого класса.

Формализованное решение задач оптимума номинала зависит от конкретной практической задачи, от рассматриваемого множества стратегий  $A=\{\alpha_i\}$ , которые определяют тип модели.

В процессе развития теории оптимума номинала были предложены формы моделей, которые в дальнейшем были определены как модели первого (установление оптимума номинала оптимального с позиций функции эффективности математического ожидания) и второго (оптимальной дисперсии, меры косости, меры крутости кривой распределения и др.) классов, дискретные и непрерывные, одномерные и многомерные, статические, динамические и многошаговые.

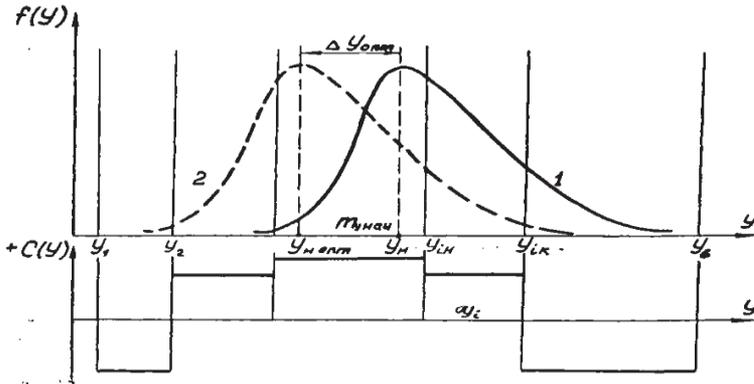


Рисунок 1 – Задача оптимизации по математическому ожиданию  $m_y$  одного показателя  $y$

Обобщением всех типов модели стала обобщенная функция эффективности оптимума номинала [3]:

$$\varphi(M_h, t) = \iint_S \dots \int C(Y) f(y, M_h, t) dc dy dt$$

$$M_h = \eta(X, t), h = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$X \in X_{\text{дон}}; \quad Y \in Y_{\text{дон}} \quad (3)$$

где  $\varphi(M_h, t)$  – многомерная функция эффективности оптимума номинала, зависящая от многих случайных величин  $Y$ , от параметров  $M_h$  распределения случайных величин  $Y$  и времени  $t$ ;  $f(y, M_h, t)$  – плотность распределения  $Y$ ,  $C(Y)$  – полезность областей  $S$

значений  $Y$ . Выражение (2) – ограничения на  $\varphi$  в виде зависимости параметров распределения от решений  $X$  (стратегий  $\alpha$ ). Решения характеризуются управляемыми переменными  $X$  – факторами, от которых зависит изменение параметров распределения (математического ожидания, дисперсии и др.). Выражения (3) – ограничения на параметры модели.

При исследовании сложных систем, поведение которых зависит от множества параметров и условий, изменяющихся со временем, невозможно в реальности получить набор реализаций (статистические данные) показателя (индикатора) или множества показателей развития сложной системы. В этом случае можно воспользоваться результатами имитационного моделирования, в том числе – когнитивного имитационного моделирования на этапе построения сценариев развития ситуаций. Данные вычислительного эксперимента, полученные в результате колебания в некоторых пределах значений возмущающих импульсов, вносимых в определенные вершины когнитивной модели, могут имитировать возможные натуральные процессы в системе. Рисунок 2 иллюстрирует постановку задачи об оптимуме номинала на таких реализациях.

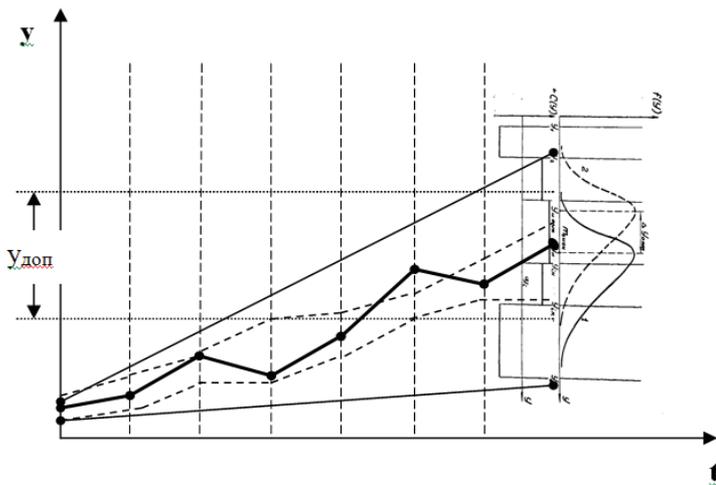


Рисунок 2 – Иллюстрация постановки одномерной задачи оптимума номинала первого класса по данным реализаций импульсных процессов на когнитивной карте

На рисунке 3 изображена укрупненная схема моделирования задачи принятия решений устойчивого развития территории на основе когнитивного моделирования и оптимума номинала.

### Некоторые результаты исследования

Анализ возможности устойчивого развития территорий Южного Федерального округа потребовал в начале исследования для разработки когнитивной модели применить методы работы с географическими картами.

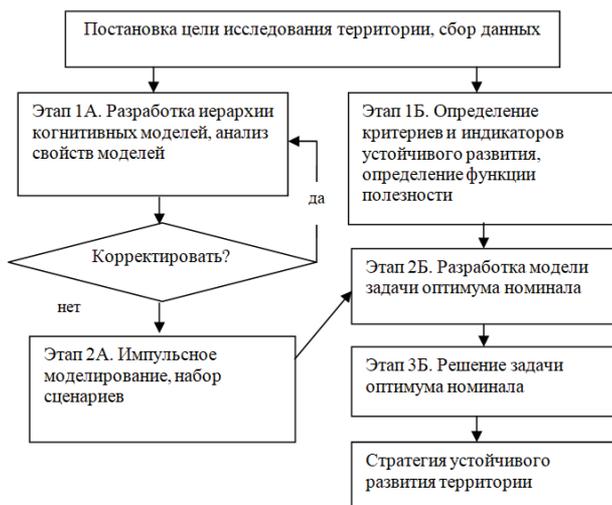


Рисунок 3 – Укрупненная схема моделирования задачи принятия решений устойчивого развития территорий

На рисунке 4 изображен картографический граф (картоид) округа, который позволяет перейти к систематизации информации о состоянии и развитии округа.

На рисунке 4 дуги графа, характеризующие факт возможных взаимодействий между территориями, должны быть «раскрыты» с экономических, гуманитарных, социальных, экологических и др. позиций, влияющих на устойчивое развитие и согласованными с целями устойчивого развития (ЦУР). В результате этих действий разрабатывается иерархическая когнитивная модель, верхний уровень которой определяется картоидом ЮФО – рисунок 4.

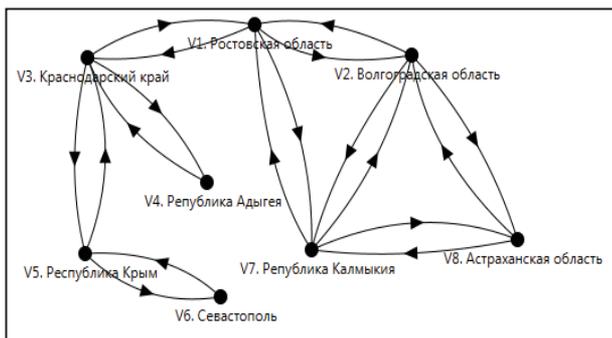


Рисунок 4 – Картоид ЮФО

Для оценки воздействий и их результатов используются различные статистические и географические информационные методы, экспертные методы, которые последовательно раскрывают концепты карты верхнего уровня G1 (рисунок 5).

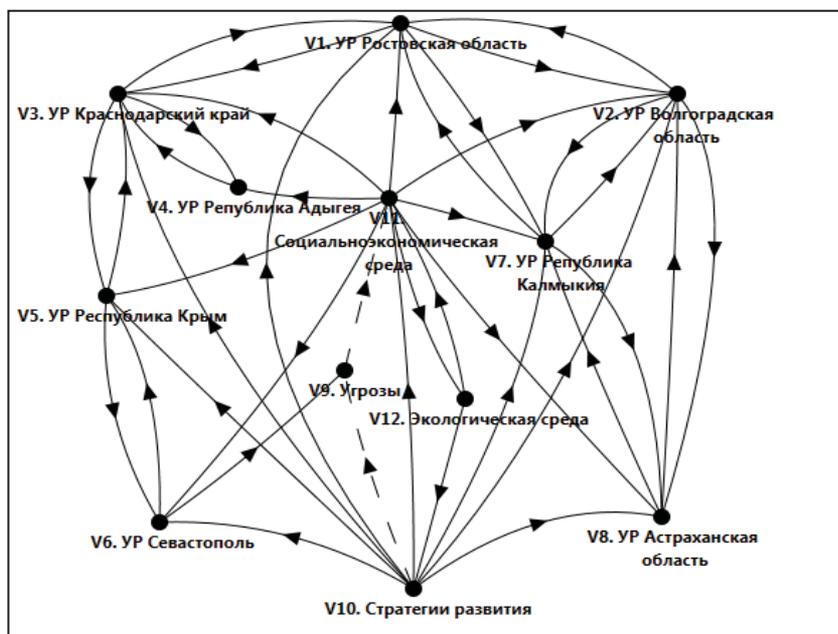


Рисунок 5 – Когнитивная карта G1 сложной системы ЮФО

После проверки свойств модели G1 (анализ структурных и динамических свойств) с помощью программной системы CMCS [7] на ней было проведено импульсное моделирование различных сценариев возможного развития ситуаций в системе ЮФО.

На рисунке 6 изображены графики импульсных процессов, полученных при моделировании сценария: «Что будет, если при положительном развитии социально-экономической и экологической среды (внесение положительных импульсов в вершины V11, V12 в начале моделирования) начнут нарастать угрозы (импульс в вершину V9), а далее начинается управление процессом путем реализации стратегии устойчивого развития» (4-й такт моделирования).

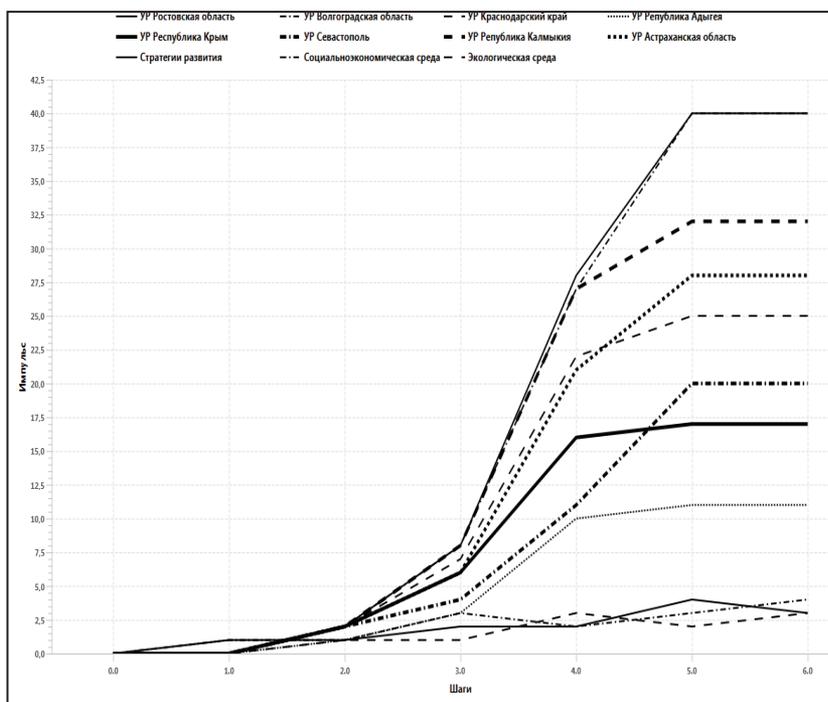


Рисунок 6 – Графики импульсных процессов на модели G1

Как видно по графикам импульсных процессов (рисунок 6), на первых тактах моделирования наблюдается тенденция нарастания, а

далее стабилизации величины импульсов в вершинах «Устойчивое Развитие» (УР) субъектов ЮФО (следование критериям устойчивости «сложное динамическое свойство класса управляемости»).

Между субъектами ЮФО существует межрегиональный обмен (экономический, культурный и др.), который может обеспечивать условия устойчивого развития всей системы ЮФО. На рисунке 7 изображена когнитивная карта, изображающая структуру межрегиональных отношений между двумя регионами: Ростовской областью и Краснодарским краем. Аналогичные карты разработаны для остальных регионов, детализирует дуги – двусторонние отношения между субъектами (рисунки 4 и 5).

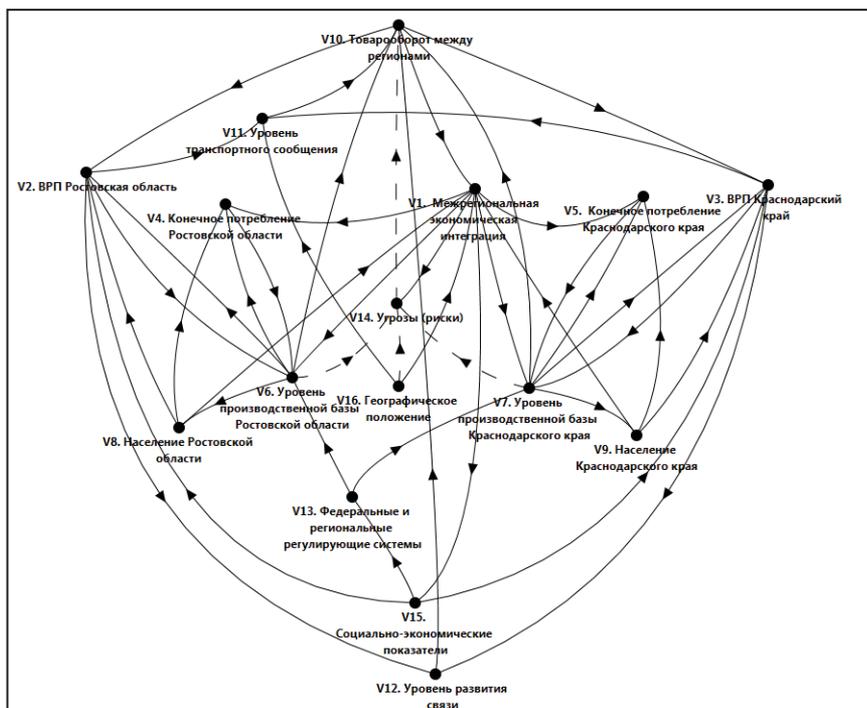


Рисунок 7 – Когнитивная карта G2 «Межрегиональный обмен»

## Заключение

В работе представлены несколько результатов когнитивного исследования сложной системы «Южный федеральный округ» на этапах 1А, 2А. Эти результаты являются основой для реализации этапов 2Б и 3Б. В завершении исследования должны быть разработаны рекомендации к реализации стратегий устойчивого развития территорий.

### Литература:

1. Новая парадигма развития России (Комплексные исследования проблем устойчивого развития) / Под ред. В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашева. – М.: Изд-во «Академия», Иркутск: РИЦ ИП «Облформпечать», 2000. – 460 с.
2. Ростовская область – движение к целям устойчивого развития: 2016-2022. Информационно-аналитический материал / Ростовстат. – Ростов н/Д, 2023. – 325 с.
3. Горелова Г.В. Моделирование задач принятия решений в условиях вероятностной неопределенности для производственных систем // Известия ЮФУ. – 2019. – №1. – С. 177-188.
4. Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.А. Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 2006. – 332 с.
5. Pankratova N., Gorelova G., Pankratov V. Study of the plot suitability for underground construction: Cognitive modeling // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1246. – P. 246-264.
6. Кульба В.В., Кононов Д.А., Ковалевский С.С., Косяченко С.А., Нижегородцев Р.М., Чернов И.В. Сценарный анализ динамики поведения социально-экономических систем. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 122 с.
7. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661506 от 07.09.2018.
8. Горелова Г.В., Здор В.В., Свечарник Д.В. Метод оптимума номинала и его применение. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.