



Постановка задачи и анализ направлений прогнозирования применительно к оценке устойчивого развития территориального образования

М.А. Боярчук¹✉, И.Г. Журкин¹, П.Ю. Орлов¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ 000002248@edu.miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Боярчук М.А., Журкин И.Г., Орлов П.Ю. Постановка задачи и анализ направлений прогнозирования применительно к оценке устойчивого развития территориального образования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 54–72. DOI:10.30533/GiA-2025-054.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА геоинформационный анализ, природно-ресурсный потенциал, устойчивое развитие, конечно-разностная модель, прогноз

АННОТАЦИЯ К настоящему моменту выполнено большое количество исследований в сфере прогнозирования устойчивого развития как в части отдельных составляющих, так и в масштабах целых стран, в том числе в соответствии с нормативными документами ООН. При этом не наблюдается единого мнения об используемых подходах, математическом аппарате и критериях устойчивости. В данном исследовании предпринята попытка сформулировать и формализовать задачу прогнозирования устойчивого развития, а также провести анализ накопленного опыта и выбрать наиболее подходящий метод прогноза устойчивого развития территории произвольного состава и смешанной организационной структуры. Предложены основные категории и базовые сценарии прогноза устойчивого развития. В качестве необходимой и достаточной выбрана точность прогноза в 10–20 %. Рассмотрены линейные множественные модели, панельные данные, регрессионно-дифференциальные модели (в том числе с использованием метода опорных векторов), оптимизационные математические, конечно-разностные модели, методы машинного обучения. Отмечены их достоинства и недостатки. Представлены требования к прогнозированию устойчивости развития территориального образования, а также стратегии и сценарии их развития. По итогам исследования сделан вывод, что конечно-разностная модель и искусственные нейронные сети являются наиболее перспективными из рассмотренных подходов. Однако к недостаткам применения искусственных нейронных сетей относятся необходимость экспериментального подбора структуры сети под решаемую задачу, возникновение тупиковых ситуаций при обучении и непредсказуемость результатов.

1 Введение

Эффективное управление регионами требует оценки экологического состояния, природно-ресурсной базы и социальных индикаторов, а также прогнозирования их динамики под воздействием антропогенных факторов. Реализовать это позволяет геоинформационный подход, предполагающий создание специализированной системы для пространственного анализа и моделирования устойчивого развития (УР), которая объединяет экологические, экономические и социальные данные в единую цифровую платформу, что обеспечивает наглядность, точность и обоснованность решений для органов власти. УР предполагает гармоничное сочетание экономического роста, социального благополучия и экологической устойчивости, что особенно важно в условиях растущего давления на природные ресурсы и окружающую среду, а также снижающейся экономической стабильности. При этом с понятием УР связан ряд проблем, начиная с отсутствия общепринятой его трактовки и заканчивая вопросами его формализации, оценки и прогноза. Прогнозирование УР поможет определить оптимальные способы использования природных ресурсов, минимизации негативного воздействия на окружающую среду и сохранения экологического баланса. Без точных прогнозов достижение целей ООН в области УР к 2030 году становится невозможным.

Цель данной работы — провести анализ накопленного опыта в области прогнозирования УР с тем, чтобы выбрать наиболее подходящий метод (или при необходимости синтезировать собственный) и использовать его в рамках научных исследований соответствующего направления, проводимых в настоящее время в Московском государственном университете геодезии и картографии. Актуальность данной работы обусловлена тем, что, несмотря на активное участие государственных и частных организаций, научно-исследовательских институтов и университетов, независимых исследователей и некоммерческих партнерств, освещение проблем УР в средствах массовой информации, отсутствует системный подход к прогнозу УР и комплексное рассмотрение связанных с этим вопросов. Применяются различные математические и технические подходы, затрудняющие масштабирование решений на любой уровень территории, рассматриваются частные задачи оценки и прогнозирования одной составляющей УР либо только одного частного показателя.

2 Материалы и методы

2.1 Постановка задачи

Понятие «устойчивое развитие» фактически было введено в оборот Генеральной Ассамблеей ООН в 1987 году и с тех пор широко употребляется применительно к различным сферам деятельности человечества, что, впрочем, не означает наличия единственной и общепринятой трактовки данного термина. В настоящее время природно-ресурсный подход к развитию является преобладающим. В рамках данного исследования будем придерживаться определения УР как успешного развития человеческого сообщества, осуществляющего хозяйственную деятельность, без угроз для среды обитания [1]. При этом использование слова «развитие» подразумевает, во-первых, сравнение показателей УР с их предыдущими значениями, т. к. развитие невозможно в одной точке времени, а во-вторых, увеличение хотя бы одного из показателей при неизменности (или отсутствии существенного падения) других показателей, что отражает устойчивость.

С точки зрения формализации будем рассматривать УР как совокупность показателей экологической, социальной и экономической устойчивости, составляющих вектор УР G в трехмерном аффинном пространстве:

$$G(t) = \{G_{эки}(t), G_{экл}(t), G_{соц}(t)\}.$$

При этом каждый показатель, в свою очередь, является интегральным и зависит от множества частных (дифференциальных) составляющих, в совокупности всесторонне описывающих состояние рассматриваемого субъекта в той или иной области и имеющих временной характер. Прогнозированию в такой модели подвергается каждый показатель (экономический, экологический и социальный) отдельно. Упор только на экономику либо рассмотрение только экологических вопросов противоречит самой сути УР — комплексного подхода рационального и сбалансированного использования среды обитания человека. Составляющие УР непрерывно влияют друг на друга: например, добыча полезных ископаемых для усиления экономики региона непременно приводит к загрязнению территории, нарушению почвенного и лесного покрова и впоследствии — к снижению социального благополучия. Поэтому прогнозирование УР должно учитывать взаимное влияние его составляющих. Таким образом, прогнозная задача заключается в оценке состояния всех трех составляющих УР в некотором моменте или на некотором временном отрезке в будущем по имеющимся данным на текущий момент и на некотором отрезке в прошлом, а также в оценке устойчивости этих составляющих путем сравнения с заданным порогом и в оценке их динамики.

Стоит отметить, что существует немало количество работ, направленных на прогнозирование тех или иных составляющих УР, как правило, рассматриваемых в отрыве от остальных (в частности экономической и экологической составляющих), или даже отдельных частных показателей, например численности населения. При этом математические основы прогноза в таких исследованиях часто совпадают.

Оценка и прогнозирование УР проводятся на уровне территориальных образований, которые можно условно (однако не всегда) приравнять к административно-территориальным единицам уровня области или района. В некоторых случаях может быть более обоснованным деление не по административным, а по естественным границам экосистем, ландшафтов или экономических кластеров. Стоит также отметить, что в задаче прогнозирования УР территориального образования не ставится требование к высокой точности получаемого прогноза, т. к. полученная оценка может отличаться от вычисленных показателей УР в будущем вследствие влияния внешних или неучтенных факторов, а попытка достичь максимальной точности прогноза может привести к неоправданному усложнению математической модели. Поскольку прогноз носит стратегический характер, в качестве приемлемой примем точность прогноза в 10–20 %. Дифференциальные составляющие УР, в свою очередь, желательно определять максимально точно из-за их большого количества и участия в дальнейших вычислениях, чтобы избежать значительного накопления ошибки.

Такой подход позволяет реализовать методологию, при которой для перебора значений большого числа (более сотни) частных критериев при составлении различных прогнозных сценариев возможно применить искусственный интеллект, в частности нейросетевые технологии, помогающие выбрать оптимальный план развития.

2.2 Обзор направлений прогнозирования

Для решения задачи по выявлению основных направлений прогнозирования УР региона был проведен анализ научной литературы, включающий 25 источников (отечественных и зарубежных), опубликованных в период с 1995 по 2024 год. Критериями отбора послужили релевантность тематике прогнозирования регионального развития, описание конкретных математических и инструментальных методов, а также охват различных компонент УР (экономической, социальной, экологической). Рассматривались статьи, в которых описывалось прогнозирование либо УР в целом (что встречается довольно редко), либо каких-либо его составляющих, в частности природно-ресурсного потенциала.

3 Результаты

3.1 Анализ и применимость методов прогнозирования составляющих устойчивого развития

Для прогнозирования экономических и социальных показателей регионов широко используются линейные множественные модели (ЛММ). Как показано в статье [2], ЛММ находят применение при решении таких задач, как прогнозирование безработицы в РФ в зависимости от начисленной заработной платы и доли занятых лиц, прогнозирование валового регионального продукта, случаев заражения COVID-19, потребления регионом электроэнергии. К достоинствам ЛММ можно отнести ее простоту и, как следствие, высокую распространенность, а также использование статических данных в качестве входных, к недостаткам — невысокое качество прогноза. В большинстве рассматриваемых далее научных работ отмечается, что предлагаемые в них методы дают лучший результат, чем ЛММ.

Некоторое распространение получает и моделирование на основе панельных данных, являющееся развитием регрессионных моделей [3]. Сам термин «панельные данные» появился в эконометрике и обозначает временные ряды, содержащие в себе пространственную информацию [4, 5]. В частности, существует исследование, в котором оценивается роль природных ресурсов в международной торговле и финансовом развитии территорий на основе статистического набора данных 30 стран на макроуровне. Данный метод предполагает составную структуру объекта исследования, при этом используется общий набор факторов, что не позволяет учитывать специфику конкретных субъектов хозяйствования [6]. В контексте данной работы внутреннее разделение исследуемых территориальных образований выглядит избыточным, при этом данный подход усложняет модель прогнозирования.

Другим подходом, находящим применение в прогнозировании социальных и экономических систем, является регрессионно-дифференциальная модель. При этом, как правило, используется регрессионно-дифференциальная модель второго порядка, а ряд решаемых задач включает прогнозирование индекса человеческого развития, туризма, развития горнодобывающей промышленности и т. д. Как следует из названия, регрессионно-дифференциальная модель опирается на описание моделируемого процесса при помощи дифференциальных уравнений, при этом порядок модели означает порядок уравнения. Данный подход сложен в практической реализации из-за большого количества настраиваемых параметров (часть из которых не поддается теоретическому обоснованию), а также требует использования специальных программных средств. К преимуществам такого подхода можно отнести высокое качество прогнозирования, обуславливаемое включением в модель скорости изменения моделируемых процессов во времени [2].

В случае большого числа обуславливающих факторов для построения регрессионной модели может применяться метод опорных векторов, как показано в некоторых работах [7, 8]. Данной проблеме посвящен ряд научных публикаций из Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета, в которых предлагается несколько способов получения прогноза, таких как использование конечно-разностных моделей и методов машинного обучения. При этом авторы отмечают, что большое количество работ на данную тему носит исключительно экономический характер и лишь незначительная часть исследований на русском языке была опубликована за последние 7 лет. Значимых работ в области математического моделирования природно-ресурсного потенциала (ПРП), который может быть принят за $G_{экл}$ в (1), авторский коллектив в открытом доступе не обнаружил [9].

Необходимо также отметить, что в зарубежных и отечественных источниках распространено использование оптимизационных математических моделей

для решения таких задач, как моделирование добычи природного газа [10] и других невозобновляемых природных ресурсов [11]. Однако в подобных работах зачастую рассматриваются детерминированные модели для оценки отдельных ресурсов, что не позволяет использовать данные модели напрямую. К недостаткам подобного подхода можно отнести необходимость наличия оптимизирующей функции и математической формализации исследуемого объекта, а также высокие требования к квалификации исследователей. Кроме того, оптимизационные методы могут работать некорректно при моделировании стохастических явлений, например различных экономических факторов.

Схожими недостатками обладают и методы, основанные на описании динамических систем при помощи систем дифференциальных уравнений. Как и балансные модели, такие методы плохо подходят для описания поведения сложных социально-экономических систем.

Одним из наиболее перспективных решений выглядит использование конечно-разностных моделей. Конечно-разностные модели получаются путем добавления в модель множественной линейной регрессии авторегрессионных слагаемых первого и второго порядка, позволяющих учитывать влияние прошлых значений ПРП на текущее. Порядок авторегрессионной модели определяет количество учитываемых прошлых отсчетов.

Частные показатели при этом упорядочиваются так, чтобы сумма квадратов разностей между текущим и предыдущим показателями ПРП была минимальной, что, с одной стороны, позволяет исключить субъективность при определении весовых коэффициентов, а с другой — вызывает вопрос об адекватности такого ранжирования реальности, поскольку рассматриваемый подход базируется на том, что ПРП должен быть максимально инертен. Таким образом, резкое изменение значения одного из факторов может привести к тому, что для оценки ПРП этого года он сильно потеряет в оценке важности, а значит, уменьшится и его вклад в ПРП.

В уравнение включают только существенные факторы, которые отбираются на основе анализа матрицы парных коэффициентов корреляции. При этом в модель добавляют такие объясняющие переменные, которые тесно связаны с объясняемой величиной и слабо связаны друг с другом. Возможно также построить математическую модель, используя пошаговые процедуры регрессии. В таком случае факторы добавляются в уравнение или исключаются из него до тех пор, пока увеличивается исправленный коэффициент детерминации.

С учетом авторегрессионных слагаемых первого и второго порядка величина отдельных составляющих ПРП вычисляется по формуле

$$2 \quad Y_{расч}(t_k) = a + b \times Y(t_{k-1}) + d \times Y(t_{k-2}) + \sum_{j=1}^m c_j \times X_j(t_k),$$

где a — постоянная ЛММ, характеризующая уровень ПРП в условиях нулевых факторов;

b и d — параметры, описывающие влияние предшествующих величин ПРП;

$X_j(t_k)$ — факторы, определяющие значение ПРП;

c_i — коэффициенты ЛММ, характеризующие вклад соответствующих факторов в итоговый результат;

t_k — момент времени в пределах изучаемого временного интервала.

Такая модификация ЛММ называется конечно-разностной моделью второго порядка (КРМ-2). При этом оценка неизвестных параметров уравнений выполняется на основании модифицированного метода наименьших квадратов, сохраняющего знаки коэффициентов при факторах такими же, как в исходной линейной модели.

Для апробации предложенной модели использовались статистические данные Пермского края, включающие в себя такие факторы, как посевные площади сельскохозяйственных культур, среднегодовая численность занятых в экономике, инвестиции в основной капитал предприятий, внесение минеральных и органических удобрений, стоимость основных фондов на конец года, лесовосстановление, число предприятий и организаций на конец года, цена нефти Brent и экспорт продукции топливно-энергетического комплекса. Данные

факторы остались после исключения факторов с высокой взаимной корреляцией и использовались для прогноза таких составляющих ПРП, как добыча нефти и газа, производство удобрений и древесины, продукция сельского хозяйства. Стоит отметить, что в приведенном эксперименте набор факторов не был неизменным на всем моделируемом отрезке времени, а различался количеством и составом для интервалов с 2001 по 2008 год и с 2008 по 2018 год.

В проведенном эксперименте конечно-разностные модели превосходили в точности модель множественной линейной регрессии в 78 % случаев. Показано также, что данная модель может использоваться и для прогнозирования социально-экономических процессов [9]. Другим достоинством ЛММ и КРМ является возможность прогнозирования изменения ПРП региона в зависимости от изменения факторов. Так, уменьшение факторов среднегодовой численности занятого в экономике населения и цены нефти на 5 % из описанного выше набора статистических данных Пермского края при использовании КРМ-2 привело бы к уменьшению числовой оценки ПРП на 3,91 % в 2019 году и на 3,1 % в 2020 году [12].

Актуальность применения машинного обучения обусловлена тем, что традиционно используемые модели либо сложны в настройке, либо демонстрируют слишком плохой результат. На текущий момент методы машинного обучения успешно применяются некоторыми исследователями для таких задач прогнозирования частных составляющих ПРП, как оценка совокупности водных запасов в бассейне реки Тебриз (Иран) [13], прогнозирование урожаев различных видов зерновых, добычи нефти и т. д. Рассматриваются и вопросы экологической оценки: так, в работе [14] выполнялось исследование качества воздуха городских территорий Индии и прогнозирование его параметров с помощью сверточной нейронной сети. Не остаются без внимания и глобальные проблемы УР. В работе [15] перед авторами стояла задача прогнозирования достижения показателей ООН по УР регионов и отдельных стран к 2030 году с помощью модели ARIMAX и линейной регрессионной модели, сглаженной посредством модели Хольта — Винтерса. Однако не было обнаружено исследований, направленных на применение инструментов машинного обучения для прогнозирования ПРП территориального образования в целом [16]. Так, в исследовании [17] авторы использовали стандартные инструменты пакета Statistica 12, а именно экстраполяцию по логарифмической и степенной функции, полиному второй степени, и некий нейросетевой прогноз (суть которого, включая архитектуру модели, осталась нераскрытой) для прогнозирования динамики численности населения, продолжительности жизни, безработицы, среднедушевого дохода, валового регионального продукта на душу населения, объема сброса неочищенных сточных вод на душу населения. В качестве тестового региона для исследования выступила Ленинградская область, а исходными данными для расчетов стали социально-экономические показатели из сборников Росстата «Регионы России» за 2000–2018 годы.

В работе [16] были рассмотрены несколько алгоритмов машинного обучения, относящихся к линейным, нелинейным, ансамблевым и нейросетевым. В качестве конкретных представителей данных групп были выбраны множественная линейная регрессия, дерево принятия решений, случайный лес, градиентный бустинг и многослойный персептрон. Данные для расчетов использовались те же, что и в работе [9]. Реализация отобранных алгоритмов была проведена в среде Jupiter Notebook 6.1.4 средствами Python 3.8.5 и библиотеки scikit-learn 0.23.2. В качестве критериев сравнения результатов использовались коэффициент детерминации, квадратный корень из средней квадратической ошибки моделирования, средняя абсолютная ошибка моделирования и относительная погрешность прогнозирования на валидационной выборке.

В проведенных исследованиях показано, что нелинейные модели машинного обучения демонстрируют лучшие аппроксимационные и прогностические свойства по сравнению со множественной линейной регрессией для задачи прогнозирования показателя природно-ресурсного потенциала. По большинству критериев лидируют методы дерева решений и градиентного бустинга. Модель многослойного персептрона в среднем уступает другим алгоритмам,

по не так сильно, как линейная регрессия, показавшая худший результат по всем критериям, при этом ее средняя квадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка и относительная погрешность прогнозирования хуже на порядок.

Стоит отметить, что к недостаткам искусственных нейронных сетей (ИНС) относятся необходимость экспериментального подбора структуры сети под решаемую задачу, возникновение тупиковых ситуаций при обучении и непредсказуемость результатов. Подход к проектированию и обучению ИНС может оказывать значительное влияние на результат.

Существуют и работы, пытающиеся спрогнозировать развитие региона с использованием различных спорных с научной точки зрения понятий, таких как «плотность времени развития региона», «скорость и ускорение развития региона». Авторы утверждают, что в информационном обществе плотность времени меняется в зависимости от информационно-синергетических потоков (ИСП). При этом поток крайне неконкретно определяется как «любая интересующая исследователя информация, получаемая регионом» [18, с. 9], что оставляет большое поле для влияния субъективности исследователя.

Вектор направления развития региона и устойчивость в выбранной области (оба понятия рассматриваются в пространстве предлагаемой авторами модели) определяются отношением G величины выходящего в единицу времени ИСП (B) к разности максимального выходящего ИСП (B_{max}) и текущего:

$$3 \quad \blacktriangleright \quad G = \frac{B}{B_{max} - B}.$$

Значение $G = 0,62$ определяет устойчивое положение, соответствующее величине золотого сечения. Значение $G > 0,62$ говорит о разнородности и ослаблении связей между рассмотренными субъектами региона, т. е. о дисгармонии. $G < 0,62$ характеризует большую однородность, бедность в разнообразии продукции [18].

Ссылаясь на некоторые проведенные (но не приведенные) расчеты, авторы делают вывод о том, что развитие региона становится устойчивым при выполнении соотношения

$$4 \quad \blacktriangleright \quad T_r = 0,38T_{max},$$

где T_{max} — максимальное значение времени для производства продукции;
 T_r — гармоническое значение времени для УР при производстве продукции.

Из выражения (4) делается вывод, что «инновационные усовершенствования и модернизация при устойчивом развитии региона происходят непрерывно с рентабельностью 38 % от максимального значения по времени» [18, с. 9].

Вводится также коэффициент развития региона $K(t)$:

$$5 \quad \blacktriangleright \quad K(t) = \left(1 + t \times \frac{A-B}{C}\right)^{\left|\frac{B}{A-B}\right|},$$

где A — входящий информационно-энергетический поток в единицу времени в регионе;

B — выходящий из региона информационно-синергетический поток в единицу времени;

C — имеющийся в регионе информационно-синергетический поток;

t — данное время.

Как отмечено в заключении работы, коэффициент развития может быть найден лишь по четырем указанным выше параметрам, не включая в явном виде заявленные плотность и ускорение времени. Каких-либо конкретных примеров расчетов устойчивости развития того или иного региона в статье [18] не приводится. Кроме того, методика количественной оценки информационных потоков региона также неясна. Можно предположить, что в основе исследования, указанного выше, лежит работа [19], содержащая аппарат расчета эргатического капитала социумов и индексов социоприродного развития в рамках энергоинформационной модели, однако и в этой монографии не рассмотрены вопросы прогнозирования составляющих УР, а расчет безразмерных синтетических

индексов развития российских регионов выполнялся на доступных на тот момент данных с учетом поправочных коэффициентов неясного происхождения.

Некоторые исследователи отмечают, что использование экстраполяции временных рядов (трендов) не позволяет создать модель, адекватно описывающую будущее, особенно с учетом ненаблюдаемых внешних возмущений. Другим недостатком полиномиальных моделей является неспособность рассчитывать асимптотические приближения критерия, наблюдаемые в реальности [20].

Имеется ограниченная информация о создании автоматизированной системы регионального экологического прогноза, которая позволяет оценить изменения в состоянии растительного покрова (включая леса и сельскохозяйственные культуры), почвы, грунтовых вод (их запасы и качество), гидрологической сети и уровня загрязнения природно-территориальных комплексов площадью от 50 до 5000 км². В системе учитываются различные виды загрязнений (промышленными отходами, пестицидами, радионуклидами и другими веществами), вырубка лесов, изменение земельного фонда, использование удобрений, орошение, посадка деревьев, выпас скота, забор воды, дренаж, мелиоративные работы, а также изменения в гидрологической сети, вызванные инженерной деятельностью, межрегиональные воздействия и тенденции в климатических и погодных условиях. Система позволяет прогнозировать состояние возобновляемых ресурсов на срок от 3 до 60 лет и анализировать прошлые изменения. Она отслеживает динамику более чем трехсот параметров, характеризующих окружающую среду.

Система получила сертификацию от государственных органов управления, рекомендована к использованию и активно применяется для решения практических задач. В частности, заявлено ее применение при экологическом обосновании стратегии развития земледелия в Центральном Черноземье на уровне региона (Россия), а также в комплексном прогнозировании последствий аварии на Чернобыльской АЭС для сельского, водного и лесного хозяйства в загрязненных регионах (Беларусь). Кроме того, систему используют для оценки воздействия орошаемого земледелия в бассейне Арала на окружающую среду (Туркменистан)¹.

В работе [21] предложен алгоритм прогнозирования комплексной оценки устойчивости пространственно-динамического развития территорий, состоящий из восьми больших стадий, включающих постановочную, априорную, информационную, спецификацию прогностической модели, идентификацию, верификацию, экстраполяцию рейтингов достигнутого уровня развития и, наконец, интерпретацию результатов и разработку рекомендаций по повышению устойчивости развития региона. Алгоритм описан обобщенно, в частности в нем не содержится конкретных указаний по выбору той или иной модели прогнозирования, при этом данный шаг в него включен.

Авторы выдвигают следующие требования к прогнозированию устойчивости развития территориального образования:

- прогнозы должны быть научно обоснованы с учетом законов и закономерностей социально-экономического развития экономики, особенно законов цикличности;
- показатели устойчивости должны соответствовать определенным требованиям: прогнозы должны составляться заранее, необходимо выявлять тенденции, которые проявляются в отдельных отраслях и регионах при изменении техники, технологий, организации производства, обмена, распределения и потребления;
- при разработке прогнозов следует использовать прогностические модели, учитывающие множество факторов, влияющих на общие условия УР макрорегиона [21].

¹ Хомяков Д.М. Имитационное моделирование влияния абиотических факторов на гео- и агроэкосистемы для экологической экспертизы и управления продуктивностью земледелия: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1995. 42 с.

Для выполнения прогноза используется специализированное проприетарное программное обеспечение IBM SPSS Statistics v.20. Описанный алгоритм сочетает в себе применение сценарного прогнозирования, а также трендового и корреляционно-регрессионного анализа, предполагая при этом прогнозирование сразу трех сценариев — пессимистического, инерционного и оптимистического. Первый из них подразумевает небольшое уменьшение или даже сохранение текущей динамики развития исследуемого территориального образования, определенное повышение инвестиционной привлекательности и улучшение социальной сферы. Инерционный сценарий предполагает усиление инвестиционной активности, повышение технологического уровня производства с помощью его модернизации и технического переоснащения и проведение институциональных реформ. В рамках этого сценария также продолжается реализация не только национальных проектов в сферах образования, здравоохранения, агропромышленного комплекса, но и долгосрочных программ развития ключевых секторов экономики. Однако авторы не считают данный сценарий соответствующим достаточному росту качества жизни населения, поскольку инвестиционные ресурсы не используются в полной мере для развития человеческого капитала. При оптимистическом сценарии ожидается более быстрый рост инвестиций в основной капитал, что усилит инновационную составляющую экономического развития. Этот сценарий включает в себя приоритетное развитие науки, образования и здравоохранения, а также наращивание ресурсного потенциала и сферы услуг [21]. В целом данный алгоритм прогнозирования довольно близок к предложенным авторами сценариям прогнозирования УР.

В работе [22] также выделяется три основных группы стратегий, содержащих 14 сценариев развития региона (Иркутской области) до 2007 года. Природоохранные сценарии представлены в каждой из групп и направлены на достижение уровня естественного состояния природных ресурсов (лесопокрытая площадь, минеральные ресурсы, биологические ресурсы, бонитет сельскохозяйугодий и др.) с учетом дополнительных капиталовложений в мероприятия по защите природы. Обычные сценарии направлены на развитие отдельных отраслей (капиталоемких или социоориентированных) или всей экономики без учета экологических рисков, нулевого роста экономики, внедрения ресурсосберегающих технологий и перестройки экономики и др. В случае с Байкальским регионом и сопутствующей экспериментальной оценкой авторы выделяли три сценария: базовый (сохранение промышленно-сырьевой ориентации экономики), рекреационный (высокие темпы развития рекреационного комплекса и сопутствующих отраслей экономики с ежегодным приростом более 10 %), нормативный (перестройка экономики, ее диверсификация, учет экологических рисков и модернизация инфраструктуры) [22].

В работе [23] предлагается универсальный алгоритм формирования экономической модели прогнозирования УР региона на основе ретроспективного анализа значимых показателей развития региона, аппроксимации, статистических методов обработки информации и, что является наиболее важным, корреляционно-регрессионного анализа. В качестве результативного фактора выбрана численность населения региона. При этом отмечается, что частные показатели, формирующие этот фактор, должны слабо коррелировать между собой.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) обоснования выбора результативного фактора и отбора независимых частных показателей, формирующих его;
- 2) количественного анализа частных показателей парной корреляцией;
- 3) формирования уравнения множественной регрессии;
- 4) проверки значимости факторов в модели по критериям;
- 5) проверки качества множественной регрессии на основе средней ошибки аппроксимации.

Утверждение авторов, что рост численности населения указывает на экономическое развитие субъекта, довольно сомнительно, поскольку в мире существует много регионов с большим процентным приростом численности населения

(без учета миграции), при этом могут отсутствовать социально-бытовые условия для проживания, а уровень санитарии может не соответствовать требованиям ООН по УР.

В работе [24] предложен метод «окна устойчивости», или SuWi (*англ.* Sustainability Window), для комплексного анализа трех взаимосвязанных составляющих УР и выполнения соответствующих прогнозов. Для оценки экономической составляющей используется значение валового внутреннего продукта (ВВП), оценка экологии основана на индикаторах воздействия на природную среду (экологический стресс), таких как выбросы парниковых газов, биоразнообразие, изменение уровня землепользования и др., а в основе оценки социального благополучия лежат показатели здравоохранения, образования и т. д. Эти частные индикаторы индексируются относительно базового года, после чего выполняется расчет показателей продуктивности воздействия на природу и продуктивности социального благополучия на единицу ВВП. Определяются также верхние и нижние пределы изменения ВВП (максимальный и минимальный уровни экономического роста или сокращения), которые считаются устойчивыми с экологической и социальной точек зрения. Максимальный уровень роста ограничен так, чтобы не увеличивать экологический стресс, а минимальный — чтобы не снижать благополучие общества. Кроме того, учитываются абсолютные целевые значения (например, целевые показатели по снижению выбросов углекислого газа в рамках Парижского соглашения), что позволяет переходить от теоретических к практическим сценариям УР. Процесс прогнозирования включает рассмотрение всех теоретически возможных сценариев изменений в производительности экономики, воздействия человека на окружающую среду, общественного благополучия и их взаимной продуктивности, что позволяет выявить устойчивые сценарии экономического роста и спада. Прогнозирование с помощью метода SuWi может быть динамическим, с использованием временных рядов, что делает возможным анализ изменения «окна устойчивости» во времени.

В работе выделено четыре возможных сценария УР:

- экономический рост с увеличением социальной продуктивности и снижением экологической нагрузки на единицу ВВП;
- экономический рост с уменьшением социальной продуктивности, но более значительным снижением экологической нагрузки;
- экономический спад при условии увеличения социальной и экологической продуктивности;
- экономический спад с увеличением социальной продуктивности и снижением экологической нагрузки, при котором поддерживается устойчивость.

Однако нужно отметить, что сценарии экономического спада не соответствуют принципам УР, понимаемым авторами настоящей работы, а скорее имеют отношение к теории антироста. В связи с этим их не следует рассматривать как приемлемые схемы. Кроме того, неясно, каким образом во втором сценарии возможно уменьшение продуктивности социального благополучия, выражаемой как отношение величины социального благополучия к ВВП, если ни та ни другая величина не сокращаются. Работа носит теоретический характер и не содержит вариантов применения метода SuWi на реальных данных.

3.2 Предлагаемые сценарии прогнозирования

Авторы предлагают выделить две основные категории прогнозов по временной составляющей t .

- *Интенсификационный прогноз* применяется при агрессивной стратегии развития региона, когда ставится задача добиться увеличения показателей экономики, экологии и (или) общественного благополучия путем соответствующих инвестиций (например, при строительстве нового производственного комплекса, железной дороги, магистральной наземной трассы, включая нефте- и газопроводы, и т. д.). Для экономического развития будут задействованы дополнительные природные ресурсы региона (земля, леса, водные ресурсы и др.), что обуславливает необходимость

оценки влияния на экологию и общество. Для строительства и эксплуатации объекта потребуются человеческие ресурсы. При этом расчистка земель, рубка лесов и осушение болот могут привести к изменению климата в регионе. Входными данными выступают как текущие показатели региона, так и параметры инвестирования и предполагаемые целевые показатели (достигаемые пороговые значения). Прогнозирование осуществляется на короткий срок (время выполнения экономической программы, стройки объекта).

- *Эволюционный прогноз* применяется при сохранении текущих показателей развития региона (без привлечения значительных финансовых средств), когда не планируется вмешательства в экономику со стороны руководства, а состояние экологии и общества не вызывает опасений в краткосрочной перспективе. Входными данными выступают показатели за прошлые годы. Этот прогноз может применяться для всех трех составляющих УР. Например, он подходит для экологической оценки, позволяя выявить степень ухудшения экологии и его временной горизонт при текущем уровне влияния человека; может также использоваться как первое приближение для прогноза УР по сценарию интенсификационного прогноза в условиях недостаточной информации о влиянии реализуемых проектов на состояние окружающей среды и социума. Такой тип прогноза может строиться на продолжительный временной период.

На основе описанных выше категорий прогнозов можно выделить отдельные частные сценарии прогноза УР.

1. *Текущая оценка* – вычисление Q_{iT} УР на время $t_{тек}$. Данный вариант представляет собой текущий анализ на одну точку во времени.
2. *Экономический прогноз* – вычисление прогнозного значения $Q_{iП}$ УР при планировании работ / проекта строительства. Оценивается потенциальный рост экономики, ухудшение экологии, доминирующее воздействие на общество.
3. *Экологический прогноз* – вычисление прогнозного значения $Q_{iП}$ УР при интенсификации работ по восстановлению природной среды, включая лесовосстановление, заболачивание, очистку почв и грунтовых вод, биоремедиацию, вывоз отходов жизнедеятельности человека и др. Применим в регионах с неблагоприятной экологической обстановкой либо подвергшихся серьезному техногенному воздействию, включая загрязнение горюче-смазочными материалами, радиоактивными отходами и т. д. Оценивается прямое и перекрестное влияние на экономику и население.
4. *Прогноз общественного благополучия* – вычисление прогнозного значения $Q_{iП}$ УР при планировании работ по улучшению жизни населения (например, строительство объектов здравоохранения, образования, обновление жилищного фонда, увеличение числа сотрудников правоохранительных органов, введение в строй объектов рекреации и др.). Применим в регионах с неблагоприятной социальной обстановкой (изношенная инфраструктура жилищно-коммунального хозяйства, недостаточное число койко-мест объектов здравоохранения, дефицит мест в детских садах и школах, высокий уровень преступности и т. д.). Оценивается прямое и перекрестное влияние на экономику и экологию.
5. *Смешанный прогноз* – вычисление прогнозного значения $Q_{iП}$ УР при комплексном планировании развития региона. Подразумевает инвестиции в две или все три составляющие УР. Необходим для сбалансированного развития территории без ущерба для экономики, природы и человека.
6. *Пассивный прогноз* – вычисление прогнозного значения $Q_{iП}$ УР при неизменной финансовой и социальной политике в регионе.

Данный перечень частных сценариев прогноза УР не является исчерпывающим и может быть расширен в соответствии с требованиями, формируемыми государством, и (или) складывающейся обстановкой в исследуемых административно-территориальных образованиях.

4 Обсуждение

По результатам проведенного анализа накопленного опыта в области прогнозирования УР и его составляющих можно выделить следующие основные направления:

- Эконометрическое и регрессионное моделирование позволяет выявлять статистические зависимости между экономическими, социальными и экологическими показателями региона. Оно основывается на построении моделей панельных данных [3], позволяющих учитывать пространственно-временную изменчивость, и регрессионных уравнений для прогнозирования динамики ключевых параметров [2, 9, 20].
- Методы машинного обучения и искусственного интеллекта — активно развивающееся направление, которое хорошо подходит для моделирования сложных нелинейных процессов, однако полученные модели, как правило, совершенно непрозрачны. В анализируемой литературе представлены сверточные нейронные сети (*англ.* Convolutional Neural Networks, CNN), применяемые для прогнозирования качества воздуха в городской среде [14], ансамбли моделей машинного обучения, используемые для оценки природно-ресурсного потенциала, в частности потенциала подземных вод [13], и метод опорных векторов, применяемый для прогнозирования экономических и социальных показателей [7, 8].
- Методы системной динамики и оптимизационного моделирования нацелены на моделирование сложных обратных связей в системе «экономика — общество — природа» и поиск оптимальных траекторий развития. Данное направление включает оптимизационные модели управления использованием невозобновляемых ресурсов [10, 11], имитационные модели влияния внешних факторов на экосистемы, комплексные системы моделей для управления процессами регионального развития [22], концептуальные рамки для анализа всех возможных сценариев роста и деградации, такие как «окно устойчивости» (SuWi) [24].

Рассмотрев данные направления, можно сделать вывод, что в целях обеспечения наиболее адекватного прогноза самыми многообещающими являются конечно-разностная модель и искусственные нейронные сети. Первый метод представляет собой усовершенствованный вариант линейной регрессионной модели, в некотором смысле базового метода, зачастую используемого в исследованиях в качестве основы для определения эффективности предлагаемого метода и, как правило, уступающего большинству альтернативных методов. Добавление авторегрессионных слагаемых позволяет учитывать предыдущие значения прогнозируемого параметра, значительно улучшая качество прогноза. Данный класс моделей отличается прозрачностью и хорошо подходит для описания непрерывных процессов с запаздываниями, таких как накопление человеческого капитала, истощение природных ресурсов или отдача от инфраструктурных проектов. В свою очередь, методы глубокого обучения не требуют априорного задания вида функциональной зависимости и демонстрируют высокую эффективность в прогнозировании многомерных временных рядов с шумом, обладают высокой устойчивостью к пробелам в данных, но требуют большого объема данных для качественного обучения и сложной настройки, а также значительных вычислительных ресурсов.

Прогнозирование УР не является самоцелью: достижение определенных показателей или недопущение превышения пороговых значений выступает лишь первой и наглядной формой реализации устойчивости. Выполнение прогнозов, наряду с количественными оценками наборов показателей, следует рассматривать как необходимый инструмент для осуществления управления, рационального природопользования, экологического планирования и социального инфраструктурного развития. Прогнозирование предоставляет информацию, на основе которой можно оценить и принять обоснованное и эффективное решение для УР исследуемого территориального образования на заданном

временном интервале. Именно прогноз позволяет на следующем этапе осуществлять планирование в регионе или другом административно-территориальном образовании и на основе нескольких имеющихся сценариев выбрать наиболее предпочтительный.

5 Выводы

Прогнозирование УР является ключевым инструментом поддержки принятия стратегических управленческих решений. На основе анализа современных направлений прогнозирования для практической проверки выбраны два перспективных, но методологически различных подхода: конечно-разностные модели и искусственные нейронные сети. Первый подход обеспечивает прозрачность, интерпретируемость и адекватность для моделирования динамических процессов с запаздываниями. Второй подход демонстрирует высокую эффективность в прогнозировании многомерных временных рядов со сложными нелинейными зависимостями. Их отдельная апробация позволит провести сравнительную оценку преимуществ и ограничений каждого метода в контексте прогнозирования УР.

На основе комплексного подхода к УР как к системе взаимосвязанных экономической, экологической и социальной компонент предложена векторная модель УР (1). В рамках модели выделены ключевые типы прогноза — интенсификационный и эволюционный, — а также шесть частных сценариев. Разработанная схема позволяет переходить от построения прогнозов к этапу планирования, обеспечивая выбор оптимальной траектории развития региона на основе сравнения многовариантных сценариев, полученных с помощью проверяемых методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания № FSFE-2023-0005 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Журкин И.Г., Орлов П.Ю., Грузинов В.С. и др. Выбор аналитической модели и количественных показателей для геоинформационного анализа устойчивого развития территориальных образований // *Геодезия и картография*. 2024. № 9. С. 46–56. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-46-56.
2. Сиротина Н.А., Копотева А.В., Затонский А.В. Метод конечно-разностного социально-экономического прогнозирования // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021. № 1. С. 174–189. DOI:10.15593/2499-9873/2021.1.10.
3. Вдовин С.М., Гуськова Н.Д., Неретина Е.А. и др. Прогнозирование устойчивости развития региона на основе экономико-математического моделирования // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2016. № 9(342). С. 18–27.
4. Касимова Т.М. Модели панельных данных как инструмент анализа и прогнозирования экономических показателей регионов РФ // *Фундаментальные исследования*. 2020. № 3. С. 48–53. DOI:10.17513/fr.42698.
5. Ратникова Т.А. Введение в эконометрический анализ панельных данных // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 2006. Т. 10, № 2. С. 267–316.
6. Redmond T., Nasir M.A. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries // *Resources Policy*. 2020. Vol. 66. P. 65–78. DOI:10.1016/j.resourpol.2020.101591.
7. Hamdi T., Ben Ali J., Di Costanzo V. Accurate prediction of continuous blood glucose based on support vector regression and differential evolution algorithm // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 38. P. 362–372. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
8. Wang F.K., Du T. Implementing support vector regression with differential evolution to forecast motherboard shipments // *Expert Systems with Applications*. 2014. Vol. 41. Iss. 8. P. 3850–3855. DOI:10.1016/j.eswa.2013.12.022.

9. Сиротина Н.А., Копотева А.В., Затонский А.В. Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21, № 2. С. 154–166. DOI:10.14529/ctcr210215.
10. Горячев А.А. Моделирование добычи в мировых и региональных оптимизационных газовых моделях // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2015. № 6. С. 51–58. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
11. Кузнецов Ю.А., Семенов А.В., Власова М.Н. Математическое моделирование оптимального использования невозобновимых природных ресурсов // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 32. С. 45–57.
12. Затонский А.В., Сиротина Н.А. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22, № 2. С. 96–106. DOI:10.14529/ctcr220209.
13. Arabameri A., Pal S.C., Rezaie F., et al. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021. Vol. 36. P. 100848. DOI:10.1016/j.ejrh.2021.100848.
14. Chauhan R., Kaur H., Alankar B. Air Quality Forecast using Convolutional Neural Network for Sustainable Development in Urban Environments // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 75. P. 103239. DOI:10.1016/j.scs.2021.103239.
15. Chenary K., Pirian Kalat O., Sharifi A. Forecasting sustainable development goals scores by 2030 using machine learning models // Sustainable Development. 2024. Vol. 32. Iss. 6. P. 6520–6538. DOI:10.1002/sd.3037.
16. Копотева А.В., Максимов А.А., Сиротина Н.А. Модели машинного обучения в задаче прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21, № 4. С. 126–136. DOI:10.14529/ctcr210411.
17. Трещевский Ю.И., Новиков В.А., Борзаков Д.В. Прогнозирование динамики параметров устойчивого эко-социо-экономического развития регионов на основе методов эмпирического моделирования // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 32(6). С. 305–310. DOI:10.24412/2309-4788-2020-10734.
18. Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Пашкова М.И. и др. Прогнозирование регионального развития // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 6. С. 9–11.
19. Бушуев В.В., Голубев В.С., Селюков Ю.Г. Энергоинформационные основы устойчивого развития (на примере российских регионов). М.: Энергия, 2005. 58 с.
20. Затонский А.В., Сиротина Н.А. Прогнозирование экономических систем по модели на основе регрессионного дифференциального уравнения // Экономика и математические методы. 2014. Т. 50, № 1. С. 91–99.
21. Шаталова О.И. Совершенствование инструментария стратегического планирования и прогнозирования регионального развития // Материалы II Ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука — региону». Ставрополь: Фабула, 2014. С. 112–120.
22. Аргучинцева А.В., Аргучинцев В.К., Батурин В.А. и др. Моделирование и управление процессами регионального развития / под ред. С.Н. Васильева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 432 с.
23. Руденко Л.Г. Формирование методического подхода к прогнозированию устойчивого развития региона // Проблемы рыночной экономики. 2024. № 1. С. 46–61. DOI:10.33051/2500-2325-2024-1-46-61.
24. Luukkanen J., Vehmas J., Kaivo-oja J., et al. Towards a General Theory of Sustainable Development: Using a Sustainability Window Approach to Explore All Possible Scenario Paths of Economic Growth and Degrowth // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 13. P. 5326. DOI:10.3390/su16135326.

АВТОРЫ **Боярчук Матвей Александрович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
канд. техн. наук
 0000-0001-8218-2677

Журкин Игорь Георгиевич

 zhurkin@miigaik.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
д-р техн. наук, профессор
 0000-0002-2277-1557

Орлов Павел Юрьевич

 knightrider3e0@gmail.com
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
канд. техн. наук
 0000-0002-5323-4754

Поступила 02.09.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Research Objective Definition and Analysis of Forecasting Approaches in the Case of Sustainable Development Assessment of a Territorial Entity

Matvei A. Boyarchuk¹✉, Igor G. Zhurkin¹, Pavel Yu. Orlov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ 000002248@edu.miigaik.ru

CITATION Boyarchuk MA, Zhurkin IG, Orlov PYu. Research Objective Definition and Analysis of Forecasting Approaches in the Case of Sustainable Development Assessment of a Territorial Entity. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 54–72. DOI:10.30533/GiA-2025-054.

KEYWORDS geoinformation analysis, natural resource potential, sustainable development, finite difference model, forecasting

ABSTRACT By now, a large number of studies have been conducted in the field of sustainable development forecasting, both in terms of single components and on a country-wide scale, including in accordance with UN regulatory documents. However, there is no consensus on the approaches used, the mathematical apparatus and the sustainability criteria. This research attempts to formulate and formalize the task of forecasting sustainable development, as well as to analyse current experience and select the most appropriate method for forecasting the sustainable development of territories with arbitrary composition and mixed organisational structures. The basic categories and baseline scenarios for sustainable development forecasting are proposed. A forecast accuracy of 10–20 % has been selected as required and sufficient. Linear multiple models, panel data, regression-differential models, including those using the support vector machine, optimisation mathematical models, finite difference models, and machine learning methods are considered. Their advantages and disadvantages are noted. Controversial approaches and concepts from a scientific point of view are critically examined, including the time density of regional development. Requirements for forecasting the sustainability of territory development are also presented, along with strategies and scenarios for their improvement. The study leads to the conclusion that the finite-difference model and artificial neural networks are the most promising of the approaches considered. Although, the drawback of artificial neural networks application is the necessity of experimental selection of the model structure for the task to be solved, the possibility of deadlock situations during training, and the unpredictable nature of the results.

ACKNOWLEDGEMENTS The research was carried out within the state assignment No. FSFE-2023-0005 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

- REFERENCES**
- Zhurkin IG, Orlov PYu, Gruzinov VS, et al. Vybor analiticheskoy modeli i kolichestvennykh pokazatelej dlja geoinformacionnogo analiza ustojchivogo razvitiya territorial'nykh obrazovaniy [Selecting an analytical model and quantitative indicators for geoinformation analysis of territorial entities sustainable development]. *Geodesy and Cartography*. 2024;9: 46–56. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-46-56.
 - Sirotnina NA, Kopoteva AV, Zatonkiy AV. Metod konechno-raznostnogo sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniya [Finite differences method for socio-economic modeling]. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021;1: 174–189. (In Russian). DOI:10.15593/2499-9873/2021.1.10.
 - Vdovin SM, Gus'kova ND, Neretina EA, et al. Prognozirovanie ustoichivosti razvitiya regiona na osnove ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya [Region's sustainable development prediction on the basis of economic-mathematical modeling]. *National Interests: Priorities and Security*. 2016;9(342): 18–27. (In Russian).
 - Kasimova TM. Modeli panel'nykh dannykh kak instrument analiza i prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazatelei regionov RF [Panel data models as a tool for analysis and forecasting of economic indicators of Russian regions]. *Fundamental Research*. 2020;3: 48–53. (In Russian). DOI:10.17513/fr.42698.
 - Ratnikova TA. Vvedenie v ekonometricheskii analiz panel'nykh dannykh [Introduction to econometric analysis of panel data]. *Higher School of Economics Economic Journal*. 2006;10(2): 267–316. (In Russian).
 - Redmond T, Nasir MA. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries. *Resources Policy*. 2020;66: 65–78. DOI:10.1016/j.resourpol.2020.101591.
 - Hamdi T, Ben Ali J, Di Costanzo V. Accurate prediction of continuous blood glucose based on support vector regression and differential evolution algorithm. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2018;38: 362–372. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
 - Wang FK, Du T. Implementing support vector regression with differential evolution to forecast motherboard shipments. *Expert Systems with Applications*. 2014;41(8): 3850–3855. DOI:10.1016/j.eswa.2013.12.022.
 - Sirotnina NA, Kopoteva AV, Zatonkiy AV. Primenenie konechno-raznostnykh modelei dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya prirodno-resursnogo potentsiala Permskogo kraja [Finite-difference models application for short-term forecasting of the natural resource potential of the Perm region]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2): 154–166. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr210215.
 - Goryachev AA. Modelirovanie dobychi v mirovykh i regional'nykh optimizatsionnykh gazovykh modelyakh [Gas production modeling in the world and regional natural gas optimization models]. *Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2015;6: 51–58. (In Russian). DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
 - Kuznetsov YuA, Semenov AV, Vlasova MN. Matematicheskoe modelirovanie optimal'nogo ispol'zovaniya nevozobnovimyykh prirodnykh resursov [Mathematical modeling of optimal use of non-renewable natural resources]. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2012;32: 45–57. (In Russian).
 - Zatonkiy AV, Sirotnina NA. Upravlenie prirodno-resursnym potentsialom Permskogo kraja na osnove konechno-raznostnoi modeli vtorogo poryadka [Management of the natural resource potential of the Perm region on the basis of a second-order finite-difference model]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2): 96–106. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr220209.
 - Arabameri A, Pal SC, Rezaie F, et al. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021;36: 100848. DOI:10.1016/j.ejrh.2021.100848.
 - Chauhan R, Kaur H, Alankar B. Air Quality Forecast using Convolutional Neural Network for Sustainable Development in Urban Environments. *Sustainable Cities and Society*. 2021;75: 103239. DOI:10.1016/j.scs.2021.103239.

15. Chenary K, Pirian Kalat O, Sharifi A. Forecasting sustainable development goals scores by 2030 using machine learning models. *Sustainable Development*. 2024;32(6): 6520–6538. DOI:10.1002/sd.3037.
16. Kopoteva AV, Maksimov AA, Sirotnina NA. Modeli mashinnogo obucheniya v zadache prognozirovaniya prirodno-resursnogo potentsiala Permskogo kraja [Perm region natural resource potential forecasting using machine learning models]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4): 126–136. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr210411.
17. Treschevsky YuI, Novikov VA, Borzakov DV. Prognozirovanie dinamiki parametrov ustoichivogo eko-sotsio-ekonomicheskogo razvitiya regionov na osnove metodov empiricheskogo modelirovaniya [Prediction of dynamics of sustainable eco-socioeconomic development of regions based on empirical modeling methods]. *Natural-Humanitarian Studies*. 2020;32(6): 305–310. (In Russian). DOI:10.24412/2309-4788-2020-10734.
18. Volkova SN, Sivak EE, Pashkova MI, et al. Prognozirovanie regional'nogo razvitiya [Forecasting regional development]. *Bulletin of the Kursk State Agrarian University*. 2015;6: 9–11. (In Russian).
19. Bushuev VV, Golubev VS, Selyukov YuG. *Energoinformatsionnye osnovy ustoichivogo razvitiya (na primere Rossiiskikh regionov)* [Energy information foundations of sustainable development (based on the example of Russian regions)]. Moscow: Energy; 2005. 58 p. (In Russian).
20. Zatonkiy AV, Sirotnina NA. Prognozirovanie ekonomicheskikh sistem po modeli na osnove regressionnogo differentsial'nogo uravneniya [Prediction of economic system based on regression model with differential equation]. *Economics and Mathematical Methods*. 2014;50(1): 91–99. (In Russian).
21. Shatalova OI. Sovershenstvovanie instrumentariya strategicheskogo planirovaniya i prognozirovaniya regional'nogo razvitiya [Improving the tools for strategic planning and forecasting regional development]. *Proceedings of the II Annual Scientific and Practical Conference of the North-Caucasus Federal University "University Science for the Region"*. Stavropol: Fabula; 2014: 112–120. (In Russian).
22. Arguchintseva AV, Arguchintsev VK, Baturin VA, et al. *Modelirovanie i upravlenie protsessami regional'nogo razvitiya* [Modeling and management of regional development processes]. Moscow: FIZMATLIT; 2001. 432 p. (In Russian).
23. Rudenko LG. Formirovanie metodicheskogo podkhoda k prognozirovaniyu ustoichivogo razvitiya regiona [Formation of a methodological approach to forecasting the sustainable development of the region]. *Market economy problems*. 2024;1: 46–61. (In Russian). DOI:10.33051/2500-2325-2024-1-46-61.
24. Luukkanen J, Vehmas J, Kaivo-oja J, et al. Towards a General Theory of Sustainable Development: Using a Sustainability Window Approach to Explore All Possible Scenario Paths of Economic Growth and Degrowth. *Sustainability*. 2024;16(13): 5326. DOI:10.3390/su16135326.

AUTHORS **Matvei A. Boyarchuk**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security
 PhD in Engineering
 0000-0001-8218-2677

Igor G. Zhurkin

 zhurkin@miiigaik.ru
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security
 Dr. of Sci. (Engineering), Professor
 0000-0002-2277-1557

Pavel Yu. Orlov

✉ knightrider3e0@gmail.com

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security

PhD in Engineering

ORCID [0000-0002-5323-4754](https://orcid.org/0000-0002-5323-4754)

Submitted: September 02, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.