

УДК 338:502.3
ББК 65.28

МОДЕЛИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ – ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД¹

**П.В. Дружинин, д. экон. наук, доц., зав. отделом моделирования и прогнозирования
регионального развития**

Электронный адрес: pdruzhinin@mail.ru

**М.В. Морошкина, к. экон. наук, доц., н.с. отдела моделирования и прогнозирования
регионального развития**

Электронный адрес: Maribell74@mail.ru

**Г.Т. Шкиперова, к. экон. наук, доц., с.н.с. отдела моделирования и прогнозирования
регионального развития**

Электронный адрес: shkiperova@mail.ru

ФГБУН Институт экономики Карельского научного центра РАН, 185005, г. Петрозаводск,
пр. А. Невского, 50.

Важной научной проблемой является оценка воздействия экономического развития на окружающую среду и выявление закономерностей, связывающих экологические и экономические характеристики происходящих процессов. В статье рассматриваются модели влияния развития экономики региона на окружающую среду, предлагаются специальные функции загрязнения и строятся оптимизационные модели. Основное достоинство предлагаемых функций загрязнения, связывающих экономические и экологические показатели, состоит в том, что они позволяют исследовать динамику экологической эффективности инвестиций, анализировать влияние изменения структуры инвестиций и экономики и учесть возможность компенсации одного фактора другим. Получены уравнения, связывающие параметры функций, описывающих экономику в целом и отдельные секторы. Рассматривается задача оптимизации распределения инвестиций по направлениям (новое строительство, модернизация и природоохранные) и по секторам экономики. Получены соотношения параметров специальных функций, при которых достигается минимум загрязнений (условия оптимальности распределения ресурсов). Предложена методика прогнозирования эколого-экономического развития, включающая оптимизационные сценарии. Проведен анализ изменения загрязнений (выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и сбросов загрязненных сточных вод) в Карелии в зависимости от динамики валового регионального продукта. Для Республики Карелия выделены три сектора по уровню загрязнения и проведено их исследование. Проведены расчеты функций загрязнения по секторам карельской экономики по данным за 1998-2011 гг. и проанализировано соотношение реального и оптимального распределения ресурсов в этот период. Показано, что в 2000-х годах распределение ресурсов лишь частично соответствовало оптимальному. Проведенные пробные расчеты подтверждают возможность использования разработанной методики.

Ключевые слова: модель, экономика, окружающая среда, валовой региональный продукт, инвестиции, модернизация, выбросы в атмосферу, сбросы сточных вод.

1. Введение. В конце XX в. отношение к экономическому развитию стало меняться, все активнее на первый план стали выдвигаться требования повышения качества жизни, комфортных условий, сохранения природной среды. Необходимость достижения устойчивого развития предполагает обеспечение эколого-экономической сбалансированности, уменьшения воздействия на окружающую среду. Данное ограничение связано с пониманием ограниченности природных ресурсов и ассимиляционного потенциала биосферы. Развитие экономики ре-

гиона должно осуществляться с учетом экологических факторов, с обеспечением воспроизводства саморегулирующихся природных систем региона [1; 2].

Разработка стратегий развития регионов должна проводиться в рамках концепции устойчивого развития, составление экономических прогнозов должно опираться на реальную социо-эколого-экономическую ситуацию в регионе и включать оценки воздействия экономического развития на окружающую среду. В связи с этим возникают задачи нахождения балан-

¹ Исследования финансируются РФФИ, проект № 11-06-00227а
© Дружинин П.В., Морошкина М.В., Шкиперова Г.Т., 2014

са региональных интересов между потребностями в развитии на его территории тех или иных видов хозяйственной деятельности и необходимостью сохранения окружающей среды. Наиболее эффективным средством нахождения данного баланса является соответствующий экономико-математический инструментарий, прежде всего балансовые и эконометрические модели. Кроме них могут использоваться и оптимизационные модели, позволяющие осуществлять варианты расчета включения экологических факторов в региональную экономическую и инвестиционную деятельность.

Построение моделей эколого-экономических процессов и основанные на них прогнозы дают возможность разработать перспективную концепцию путей развития регионов с учетом особенностей их территорий. Различные сценарии развития экономики предполагают соответственно существенно различающиеся экологические последствия, которые необходимо анализировать и учитывать при принятии решений федеральными и региональными властями [2; 4; 6; 8; 11].

Для прогноза состояния окружающей среды и выработки разумной политики надо оценить, как развитие экономики региона влияет на окружающую среду. Для оценки введены специальные функции, связывающие экономические и экологические показатели. Они позволяют исследовать динамику экологической эффективности инвестиций, анализировать влияние изменения структуры инвестиций и экономики и учесть возможность компенсации одного фактора другим [13; 16; 20]. Исследования влияния развития экономики на окружающую среду и выявление факторов, определяющих это влияние, проводились на региональном уровне в различных странах. Если для уровня страны основное внимание уделялось парниковым газам, то для регионов рассматривались самые различные виды загрязнений. Соответственно было построено множество различных моделей и полученные по ним результаты отличаются большим разнообразием. В большинстве работ было показано, что изменение загрязнений, в первую очередь, зависит от изменения численности населения, объемов производства, структурных сдвигов и технологических изменений, причем последнее часто является определяющим.

Для исследования влияния различных факторов на динамику загрязнений предлагалось множество моделей, позволяющих также и строить прогнозы [18]. В настоящее время чаще используется STIRPAT, которая позволяет оценивать степень влияния отдельных факторов на уровень загрязнений [19; 20]:

$$Z(t) = A \times N^{\alpha}(t) \times Y^{\beta}(t) \times T^{\gamma}(t), \quad (1)$$

где $Z(t)$ – исследуемый экологический показатель (выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в целом и по видам, выбросы парниковых газов, сброс сточных вод, образование токсичных отходов и другие), $Y(t)$ – показатель, характеризующий степень развития экономики, $N(t)$ – численность населения, $T(t)$ – технологический уровень, α , β , γ – константы (определяются в ходе расчетов по реальным данным), t – год. В качестве показателя, характеризующего степень развития экономики, обычно используется валовой региональный продукт (ВРП) на душу населения.

Приведенные в работе [15] результаты исследований панельных данных по китайским регионам выявили, что за счет изменения технологий выбросы SO_2 выросли менее чем на 30% при увеличении объемов производства в 2.5 раза. Влияние такого фактора, как модернизация, было отмечено и в исследованиях на данных Испании. В работе [18] было показано, что модернизация в разной степени компенсировала рост масштабов производства для разных видов загрязнений, а для выбросов SO_2 – полностью. Расчеты, проведенные в работе [17] для канадских регионов, привели к выводу, что для канадских регионов зависимость загрязнений от ВРП отсутствует, но есть зависимость от численности населения и технологий, а также доли индустрии, доли экспорта, доли импорта, цены сырой нефти и некоторых других факторов.

В России только для примерно двадцати регионов активная модернизация производства и изменение структуры экономики привели к тому, что связь ВРП и выбросов загрязняющих веществ описывается экологической кривой Кузнецца. Бурный рост сферы услуг и сокращение доли промышленности, являющейся основным загрязнителем, обеспечили значительную часть снижения нагрузки на окружающую среду в российских регионах в 2000-х годах.

Использование функции (1) для прогнозирования не всегда удобно, часто необходимо оценить влияние такого фактора, как инвестиции, который является ключевым показателем, используемым в прогнозировании. Поэтому для анализа факторов, влияющих на динамику загрязнений, была предложена функция, аналогичная производственной функции, имеющая ясный эколого-экономический смысл. Основное достоинство предложенных двухфакторных функций загрязнения (2) и трехфакторных экологических инвестиционных функций (3), связывающих экономические и экологические показатели, состоит в том, что они позволяют исследовать динамику экологической эффективности инвестиций, анализировать влияние изменения структуры инвестиций и эконо-

мики и учесть возможность компенсации одного фактора другим [3]:

$$Z(t) = F(U_1(t), U_2(t), t), \quad (2)$$

$$Z(t) = F(U_1(t), U_2(t), U_3(t), t), \quad (3)$$

где $U_1(t)$ – фактор, отражающий развитие экономики региона и, как правило, отрицательно влияющий на окружающую среду (кумулятивные инвестиции в экономику, инвестиции в новое строительство, ВРП или другие показатели); $U_2(t)$ – фактор, отражающий природоохранную деятельность и положительно влияющий на окружающую среду (природоохранные основные фонды, инвестиции в охрану окружающей среды в целом и по видам, текущие затраты на охрану окружающей среды или другие показатели); $U_3(t)$ – фактор, отражающий изменение действующего производства и, как правило, положительно влияющий на окружающую среду (инвестиции в модернизацию производства или другие показатели); t – год.

В качестве функций (2) и (3) чаще всего для расчетов использовалась мультипликативная функция:

$$Z(t) = A(t) \times U_1^\mu(t) \times U_2^{-\eta}(t), \quad (4)$$

$$Z(t) = A(t) \times U_1^\mu(t) \times U_2^{-\eta}(t) \times U_3^v(t), \quad (5)$$

где μ , η и v – константы.

2. Данные. В исследованиях в качестве факторов использовались следующие показатели – ВРП и его структура, оборот организаций региона и его структура, основные фонды региона и их структура, инвестиции в основной капитал региона и их структура, инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов региона и их структура, текущие затраты на охрану окружающей природной среды в регионе и другие [9; 10].

Расчеты проводились по Республике Карелия, Мурманской области и другим регионам Северо-Западного федерального округа за период с 1990 по 2012 гг. Основные проблемы при проведении расчетов были связаны с мультиколлинеарностью и коротким рядом данных, причем надо отметить, что органы государственной статистики часто меняли методики расчета некоторых показателей (классификация отходов, структура инвестиций по направлениям и другие). Также особенностью региональных данных является то, что инвестиции в охрану окружающей среды достаточно сильно колеблются, за год они могут вырасти или упасть в несколько раз.

Получить достоверный результат удалось лишь после детального и тщательного анализа данных. В 90-х годах спад в экономике Карелии привел к снижению воздействия на окружающую среду. Начавшийся с 1999 г. рост экономики большинства регионов создал опасность значительного ухудшения экологической ситуации. В реальности рост загрязнений оказался не столь значительным, а по некоторым показателям экономический рост сопровождался уменьшением экологической нагрузки [3; 7].

В Карелии наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают предприятия по производству бумаги и добывающие предприятия, такие как ОАО «Карельский окатыш», ОАО «Кондопога», ОАО «Сеgezский ЦБК» и ОАО «ЦЗ Питкяранта», которые активно занимались модернизацией производства в 1990–2012 гг. В результате выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников снижались, даже несмотря на начавшийся с 1999 г. рост производства (рис. 1).

На рис. 1 объем ВРП РК в 1990 г. принят за 100%, он уменьшается с 1991 г. до 1998 г., затем начинает расти и снова падает в 2008–2009 гг. Объем выбросов в 1990 г. принят за 100%, он практически непрерывно снижается, составив в 2009 г. 35% от уровня 1990 г. Если до 1998 г. тенденция понятна – при снижении ВРП более чем в два раза почти так же уменьшились и выбросы, то после девальвации рубля начавшийся экономический рост вскоре стал сопровождаться снижением выбросов в атмосферу. Значит, природоохранные мероприятия, модернизация оборудования и структурные сдвиги в экономике способствовали улучшению экологической ситуации. Данные выводы подтверждает и анализ графиков зависимости выбросов в атмосферу от инвестиций в экономику Карелии. Значит, при использовании двухфакторной функции загрязнения нужно выделять два подпериода, описываемые разными функциями, или вводить дополнительный параметр – нейтральный экологический прогресс, а для трехфакторных экологических инвестиционных функций необходимо вводить специальные переменные, чтобы учесть то, что вложения в модернизацию стали приносить результат только в 2000-х годах. Проведенные расчеты подтвердили данное предположение – различие подпериодов исчезало при введении нейтрального экологического прогресса, отражающего структурные сдвиги в экономике Карелии и активную модернизацию предприятий в 2000-х годах.

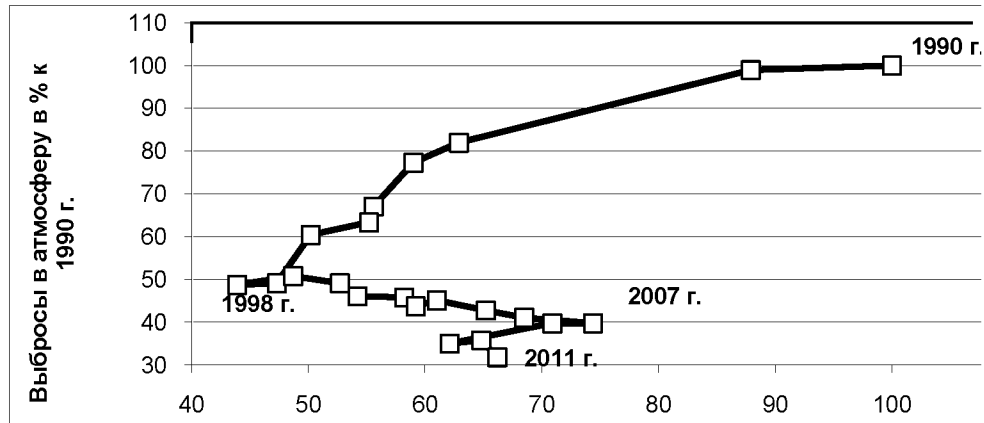


Рис. 1. Выбросы в атмосферу в зависимости от ВРП РК (1990 г. – 100%)

Сброс загрязненных сточных вод в РК (рис. 2) за последние 20 лет снизился не столь значительно. Объем сбросов за 1990 г. принят за 100%, он снижается, повторяя колебания ВРП. С падением ВРП вдвое он уменьшается лишь на 36% к 1996 г., а потом даже немного возрастает, несмотря на продолжающееся падение ВРП. Затем при росте ВРП сброс сточных вод увеличивается лишь на несколько процентов. Снижение сбросов в последние годы связа-

но с неустойчивой работой бумагоделательных предприятий. В целом данный график показывает, что до определенного момента зависимость сброса сточных вод от ВРП достаточно хорошо описывается однофакторной функцией, отклонения от которой невелики, значит, влияние природоохранных инвестиций и модернизации незначительно. В 2000 г. постепенно стало усиливаться влияние модернизации.

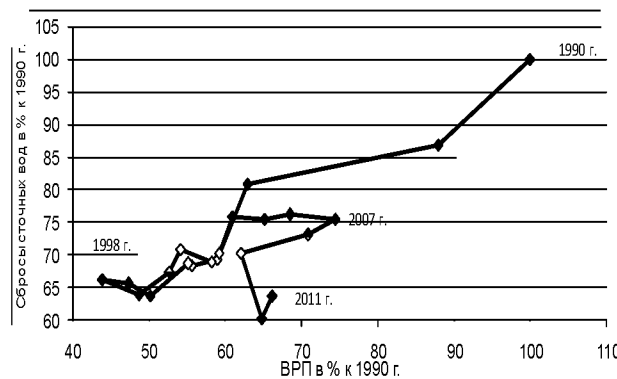


Рис. 2. Сбросы загрязненных сточных вод в зависимости от ВРП РК (1990 г. – 100%)

3. Методология. Экономика региона состоит из многих видов деятельности: есть добывающие производства, металлургия, транспорт, образование и др. Влияние разных производств на окружающую среду значительно отличается, и в ходе анализа данных целесообразно агрегирование видов деятельности в несколько секторов по степени их воздействия на окружающую среду. Агрегирование позволяет в данном случае исследовать влияние структурной и инвестиционной политики, строя сценарии развития экономики региона при различном распределении инвестиций по секторам и направлениям (новое строительство, модернизация или природоохранная деятельность), оценивать воздействие на окружающую среду.

На основе использования функций (4) и (5) была разработана методика прогнозирова-

ния, состоящая из четырех основных этапов: сбор данных и их анализ; подбор модели и ее оценка; задание сценарных условий; собственно прогнозирование.

На первом этапе рассматриваются основные показатели развития региона, выявляются особенности территории и выделяются основные секторы. Анализируются первичные данные, по исходным и «сглаженным» данным строятся графики взаимосвязи экологических, экономических и природоохранных показателей для приближенной оценки динамики факторных эластичностей и выделения периодов с различным поведением показателей. Для выбора функций также строятся линии равного загрязнения при разных значениях факторов, которые можно назвать изовастами. В результате

определяются ограничения на параметры функций и происходит выбор наиболее подходящих для расчетов функций, прежде всего исходя из соответствия поведения факторных эластичностей.

На втором этапе с учетом результатов проведенного ранее анализа данных подбираются уравнения и оцениваются их параметры за отдельные периоды и за ретроспективу в целом. Затем анализируются результаты расчетов, выясняется, почему для отдельных видов функций факторная эластичность по экономическому показателю является отрицательной, а, скажем, факторная эластичность по природоохранному показателю – положительной. При необходимости уточняются, дополняются или корректируются данные. Полученные параметры уравнений также анализируются и сравниваются с результатами предварительного изучения графиков. Выбор функций для прогнозирования, которые описывали бы исследуемые процессы наиболее адекватно, осуществляется с учетом полученных статистических характеристик.

На третьем этапе задаются различные сценарные условия, которые определяют варианты внешнего воздействия на исследуемые процессы, а также влияния политики федеральных и региональных властей. В модели это выражается различиями в распределении инвестиций, воздействии других факторов и в изменении параметров уравнений. Для данной задачи важно выявить возможные изменения в социально-экономической и экологической политике и определить их отражение в модели. Полученные по ретроспективным данным параметры уравнений являются параметрами для одного из сценариев, определяемого как инерционный. В сценариях развития региона действия субъекта управления могут привести к изменению сложившихся эколого-экономических взаимосвязей и соответственно параметров функций. Для каждого варианта эколого-экономической политики определяются сценарные условия, которые сводятся к изменению параметров функций (оно должно быть обосновано результатами ретроспективного анализа) и различным вариантам динамики экономических и природоохранных показателей на перспективу.

На четвертом этапе согласно выбранным сценарным условиям в результате расчетов по выбранным функциям на прогнозный период формируются собственно сценарии эколого-экономического развития региона (количественные оценки развития экономики и ее влияния на окружающую среду), отражающие те или иные варианты возможной политики федеральных и региональных властей и результаты внешнего воздействия. Расчеты

прогноза экологических характеристик проводятся по каждому набору сценарных условий, соответствующих разной политике [3].

Данная методика основана на поисковом прогнозировании, исходящем из сложившихся тенденций, их продолжения или отхода от них. Можно построить несколько прогнозных сценариев на основе нормативного прогнозирования, определив цель и пути ее достижения. Поскольку предложенные функции используют как факторы инвестиции, то можно искать их оптимальное распределение при ограничении на объем. Возможно перераспределение инвестиций в определенных пределах по направлениям (новое строительство, модернизация и природоохранные) или по секторам экономики (они имеют очень разный уровень загрязнений на рубль продукции). Оптимальное распределение может быть связано с максимизацией темпов роста экономики при заданной динамике загрязнений или, наоборот, минимизация загрязнений при заданном темпе роста экономики [2; 3].

Для трехфакторных экологических инвестиционных функций и двухфакторных функций загрязнения можно построить оптимизационные модели двух типов. В первом случае, когда инвестиции разделяются на три составляющих – новое строительство, модернизация и охрана окружающей среды, возникает задача оптимального распределения инвестиций $U(t)$ по трем направлениям. Оптимальное решение минимизирует загрязнения при обеспечении определенного объема производства $Y_0(t)$.

$$Z(t) = F(U_1(t), U_2(t), U_3(t), t) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$Y(t) = G(U_1(t), U_3(t)) \geq Y_0(t) \text{ – ограничение}$$

$$\text{роста производства, } U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) = U(t)$$

$$\text{– ограничение объема инвестиций,}$$

$$U_1(t) \geq 0, \quad U_2(t) \geq 0, \quad U_3(t) \geq 0, \quad \varepsilon_1 > 0, \quad \varepsilon_2 \leq 0,$$

где G – функция роста экономики от объема инвестиций по направлениям, в расчетах использовалась линейная функция.

Три исследуемых направления распределения инвестиций (новое строительство, модернизация и охрана окружающей среды) имеют разную эффективность с точки зрения минимизации загрязнений. Инвестиции в новое строительство, как правило, ведут к росту загрязнений, модернизация в настоящее время чаще немного уменьшает объем загрязнений и природоохранная деятельность в большинстве случаев наиболее эффективна и всегда ведет к снижению загрязнений. В качестве функции $Z(t)$ рассматривалась мультипликативная функция в абсолютных величинах и в темпах роста. В первом случае исследуются кумулятивные инвестиции за несколько лет, во втором случае –

инвестиции за один год, что легче с точки зрения расчетов.

Без ограничений ситуация достаточно простая, все ресурсы направляются в наиболее эффективное направление с точки зрения критерия, имеющее наименьший параметр (это или природоохранное, или модернизация). Если есть ограничение на рост производства или его темпы, зависящее от объемов нового строительства и модернизации, то решение определяется по определенной процедуре. Определять формулы и проводить расчеты удобнее для функции в темпах.

Первый случай – влияние модернизации на загрязнение отрицательно (параметр ν отрицателен). Тогда максимум вложений делается в модернизацию, и если нужный темп достижим, то остальные инвестиции направляются на охрану природы или модернизацию в зависимости от величины соответствующего параметра. Если заданный темп недостижим за счет вложений только в модернизацию, то определяем соотношение инвестиций между направлениями на новое строительство и модернизацию, обеспечивающее достижение нужного темпа роста.

Второй случай – модернизация ведет к росту загрязнений (параметр ν положителен). Как правило, коэффициент в новое строительство больше, чем в модернизацию, по крайней мере, иной результат пока при расчетах не был выявлен. Тогда получается, что мы вкладываем максимально в модернизацию, и если заданный темп достижим, то все что останется, вкладываем в охрану природы. Если заданный темп недостижим, то определяем соотношение инвестиций между направлениями на новое строительство и модернизацию, обеспечивающее достижение нужного темпа роста экономики.

Во втором варианте исследуется перераспределение факторов между секторами с целью минимизации загрязнений. Рассматривать все виды деятельности сложно из-за проблем с доступностью информации, и существенного улучшения прогноза данное усложнение не дает. Выделяется сектор с высоким относительным уровнем загрязнений, в который обычно включаются для выбросов в атмосферу добывающий сектор, производство бумаги, энергетика, металлургия и в зависимости от региона, возможно, и другие виды деятельности. Для сбросов загрязненных сточных вод и других видов загрязнений выделение секторов может отличаться. Сектора могут формироваться и по комплексному экологическому показателю [3]. Другие виды деятельности объединяются в один или два сектора. Оптимальное решение минимизирует загрязнения без ограничений или могут вводиться ограничения на изменение экономических показателей. Если фактор один, а сек-

торов несколько, то методика поиска оптимального решения повторяет предыдущую.

Для двухфакторной функции оптимальное распределение минимизирует загрязнения:

$$Z(t) = \sum_i Z_i(t) = \sum_i F_i(U_{1,i}(t), U_{2,i}(t), t) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$U_1(t) = \sum_i U_{1,i}(t), \quad U_2(t) = \sum_i U_{2,i}(t),$$

$$U_{1,i}(t) \geq 0, \quad U_{2,i}(t) \geq 0, \quad \varepsilon_{1i} > 0, \quad \varepsilon_{2i} \leq 0, \quad \overline{i=1, N},$$

где i – сектор, N – количество секторов.

Данную модель можно строить для двухфакторных и трехфакторных функций, для функций (2) возможно найти оптимальное решение в общем случае и при некоторых ограничениях.

Условие $\varepsilon_{1i} > 0$ выполняется не всегда. Если экономика региона достигает достаточно высокого уровня, то ее развитие может описываться экологической кривой Кузнецца, когда с ростом ВРП объем загрязнений падает [14]. В случае если для всех секторов обе факторные эластичности отрицательны, то, построив Лагранжиан на основе (5), получаем условия оптимального распределения ресурсов:

$$\frac{\varepsilon_{1i} \times Z_i(t)}{U_{1i}} = \frac{\varepsilon_{1j} \times Z_j(t)}{U_{1j}}, \quad \overline{i, j=1, N}, \quad (8)$$

$$\frac{\varepsilon_{2i} \times Z_i(t)}{U_{2i}} = \frac{\varepsilon_{2j} \times Z_j(t)}{U_{2j}}, \quad \overline{i, j=1, N},$$

где i, j – сектора, N – количество секторов.

Подставив в (8) мультипликативные функции (4) и балансовые соотношения из (7), получим систему двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными, легко решаемую стандартными методами. Если принять, что сумма факторных эластичностей секторов одинакова (при расчетах функций можно ввести такое ограничение), данная система преобразуется в уравнение относительно соотношения двух факторов. В результате оптимальное распределение ресурсов находится при последовательном решении нелинейных уравнений. Для других видов функций, а также при более сложных критериях получается система нелинейных уравнений, что несколько затрудняет расчеты. В зависимости от вида ограничений получаются либо последовательно решаемые нелинейные уравнения, либо системы нелинейных уравнений.

Чаше возникает ситуация, когда знаки разные. Имеется несколько секторов (отраслей) и два ресурса, причем экономическое развитие увеличивает объем загрязнений (параметр μ положителен). В данном случае для двух секторов получается функция, имеющая седловую точку и минимумы вблизи угловых точек. На самом деле не важно, сколько секторов, факторы концентрируются в одном, имеющем минимальную однородность (сумму эластичностей) μ

-η. Немного иная ситуация в случае одинаковой однородности для секторов, тогда количество решений совпадает с количеством секторов, но это тоже крайние решения, когда факторы сосредотачиваются в одном секторе. Если есть ограничения на темп роста, то решение смещается к седловой точке по траектории, которая отклоняется от диагонали в зависимости от соотношения параметров функций.

Проведенные расчеты показали, что можно рассмотреть еще несколько оптимизационных задач, которые будут ближе к реальности. Можно, учитывая, что для функций (4) рассматриваются кумулятивные инвестиции или объемы производства, что усложняет перемещение ресурсов (затраченные несколько лет назад инвестиции неперемещаемы), перейти к функциям приростным или темповым. Тогда можно будет искать решение для любых положительных значений факторов (инвестиций).

Оптимальное решение может искажаться и в общем случае, когда инвестиции можно распределять и по направлениям, и по секторам, но для нее пока практически невозможно собрать информацию:

$$Z(t) = \sum_i Z_i(t) = \sum_i F_i(U_{1,i}(t), U_{2,i}(t), U_{3,i}(t)) \rightarrow \min,$$

$$U_1(t) = \sum_i U_{1,i}(t), \quad U_2(t) = \sum_i U_{2,i}(t), \quad U_3 = \sum_i U_{3,i}(t),$$

$$Y(t) = G(U_1(t), U_3(t)) \geq Y_0(t),$$

$$U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) = U(t)$$

$$U_{1,i}(t) \geq 0, \quad U_{2,i}(t) \geq 0, \quad U_{3,i}(t) \geq 0, \quad \varepsilon_{1i} > 0, \quad \varepsilon_{2i} \leq 0, \quad i=1, N.$$

4. Результаты расчетов. Для предварительного исследования соответствия реальному и оптимального распределения инвестиций рассматривались сектора экономики РК. Для определения требуемой формулы представим экономику региона как сумму нескольких секторов, каждый из которых также описывается формулой (4), причем сектора существенно различаются по воздействию на окружающую среду. Для удобства прогнозирования лучше всего выделить сектора с высоким уровнем загрязнений или максимальной долей загрязнений. Расчеты для выбросов в атмосферу по экономике Карелии проводились при выделении трех секторов, два из которых имеют наибольшие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу – производство бумаги и добыча полезных ископаемых.

В 2010 г. доля производства бумаги в ВРП составляла примерно 7.2%, а в выбросах в атмосферу – 26%, добычи полезных ископаемых – соответственно 12% и 47%. На все остальные виды деятельности приходилось более 80% ВРП и примерно 27% выбросов загрязняющих ве-

ществ в атмосферу. В производстве бумаги рост начался с 1999 г. и относительно 1998 г. уже к 2006 г. производство удвоилось, а выбросы в атмосферу сократились в два раза. В добыче полезных ископаемых рост начался только с 2005 г., и в 2011 г. относительно 2000 г. производство выросло примерно на две трети, а выбросы в 2011 г. превышали уровень 1998 г. примерно на 5%, но были на 22% меньше, чем в 1991 г. Структура прочих отраслей изменилась очень сильно за период реформ, и выбросы в атмосферу с 1991 по 2011 гг. упали в пять раз.

Для производства бумаги по функции (4) были получены параметры $\mu=0,35$ и $\eta=0,17$. Инвестиции в охрану атмосферного воздуха не дали возрасти выбросам загрязняющих веществ, что могло произойти при росте производства. Добыча полезных ископаемых характеризуется невысоким нейтральным экологическим прогрессом $p=-0,01$, достаточно высоким влиянием роста производства $\mu=0,56$ и незначительным – инвестиций в охрану атмосферного воздуха $\eta=0,001$. Для прочих отраслей важнейшим фактором оказался нейтральный экологический прогресс $p=-0,11$, влияние основных факторов оказалось меньше: $\mu=0,005$ и $\eta=0,009$.

В результате расчетов получили, что реальные изменения в 2000-х годах близки к оптимальным лишь частично, экономический фактор (объем производства) постепенно перемещается в прочие отрасли, имеющие минимальную однородность. В то же время природоохранные кумулятивные инвестиции концентрируются в производстве бумаги.

Расчеты для сбросов загрязненных вод по экономике Карелии проводились по тем же трем секторам. Наибольшее влияние оказывает производство бумаги, но сбросы загрязненных сточных вод уменьшились почти на треть и соответственно их доля сократилась с 63% в 1991 г. до 55%.

Для производства бумаги по функции (4) были получены параметры $p=-0,025$, $\mu=0,47$ и $\eta=0,004$. Добыча полезных ископаемых характеризуется заметным нейтральным экологическим прогрессом $p=-0,02$, достаточно высоким влиянием роста производства $\mu=0,64$ и незначительным – инвестиций в охрану воды $\eta=0,005$. Для прочих отраслей важнейшим фактором оказался нейтральный экологический прогресс $p=-0,035\%$, влияние основных факторов оказалось меньше: $\mu=0,22$ и $\eta=0,083$.

В обоих случаях знаки оказались разные, экономическое развитие увеличивает объем загрязнений (параметр μ положителен), инвестиции в охрану природы уменьшают его. В данном случае получается функция, имеющая седловую точку и минимумы вблизи угловых точек. В обоих случаях максимальный эффект

без ограничений дает вложение ресурсов в прочие отрасли. Если есть ограничения на темп роста, то решение смещается к седловой точке по траектории, которая отклоняется от диагонали в зависимости от соотношения параметров функций.

5. Выводы. В статье рассматривается развитие предложенного ранее подхода к оценке влияния развития экономики региона на окружающую среду. Для некоторых видов функций построены модели, позволяющие анализировать распределение ресурсов, что может быть полезно при разработке сценариев развития региональной экономики. Проведенные пробные расчеты подтверждают возможность использования разработанной методики.

Список литературы

1. Глазырина И.П. Исследование качества экономического роста в контексте концепции устойчивого развития // Экономика природопользования. 2006. № 4. С. 21–31.
2. Дружинин П.В. Расчет параметров народнохозяйственных и региональных агрегированных производственных функций // Экономика и математические методы. 1990. Т. 26, № 5. С. 891–896.
3. Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т. Эколого-экономические модели и прогнозы в системе регионального управления // Проблемы прогнозирования. 2012. № 1. С. 88–97.
4. Замятина М.Ф. Эколого-экономическая сбалансированность регионального развития как крупномасштабная инновация // Стратегия инновационного развития регионов Северо-Запада России: опыт и проблемы (сб. науч. тр.). В 2 ч. Ч.1. СПб.: Изд-во СПбАУиЭ, 2009. С. 319–331.
5. Курило А.Е., Немкович Е.Г., Сениошкин Е.Н. Социально-экономические преобразования в Республике Карелия (1990–2005 гг.). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2007. 320 с.
6. Максимов В.П., Чадов А.Л. Красивые задачи экономической динамики с приближенным выполнением краевых условий. Конструктивное исследование // Вестник Пермского университета. Сер.: Экономика. 2012. Вып. 3 (14). С. 12–17.
7. Максимов В.П., Чадов А.Л. Дискретное управление функционально-дифференциальной непрерывно-дискретной системой // Вестник Пермского университета. Сер.: Экономика. 2013. Вып. 1 (16). С. 6–12.
8. Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / под ред. В.И. Гурмана, Е.В. Рюминой. М.: Наука. 2001. 175 с.
9. Регионы России. Социально-экономические показатели: сб. ст. / Росстат. М.: 2013. 990 с.
10. Республика Карелия: Статистический ежегодник / Карелиястат. Петрозаводск. 2013. 338 с.
11. Рюмина Е.В. Анализ эколого-экономических взаимодействий. М.: Наука, 2000. 107 с.
12. Auci S., Becchetti L. The instability of the adjusted and unadjusted environmental Kuznets curves // Ecological Economics. 2006. Vol. 60. P. 282–298.
13. He J. What is the role of openness for China's aggregate industrial SO₂ emission?: A structural analysis based on the Divisia decomposition method // Ecological Economics. 2010. Vol. 69. P. 868–886.
14. Lantz V., Feng Q. Assessing income, population, and technology impacts on CO₂ emissions in Canada: where's the EKC? // Ecological Economics. 2006. Vol. 57. P. 229–238.
15. Roca J., Serrano M. Income growth and atmospheric pollution in Spain: An input-output approach // Ecological Economics. 2007. Vol. 63. P. 230–242.
16. Warr B., Ayres R. Useful work and information as drivers of economic growth // Ecological Economics. 2012. Vol. 73. P. 93–102.
17. Wei T. What STIRPAT tells about effect of population and affluence on the environment? // Ecological Economics. 2011. Vol. 72. P. 70–74.
18. York R., Rosa E.A., Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts // Ecological Economics. 2003. Vol. 46 (3). P. 351–365.

References

1. Glazyrina I.P. Issledovanie kachestva ekonomicheskogo rosta v kontekte koncepcii ustoichevogo razvitiya [Research of quality of economic growth in a context of the concept of a sustainable development] // *Ekonomika prirodopolzovaniya* [Environmental management Economy]. 2006. No. 4. P. 21–31.
2. Druzhinin P. V. Raschet parametrov narodnochozjaictvennykh i regionalnykh agregirovannykh proizvodstvennykh funktsiy [Calculation of parameters of the economic and regional aggregated production functions] // *Economica i matematicheskie metody* [Economy and mathematical methods]. 1990. Vol. 26, No. 5. P. 891–896.
3. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T. Ecological and Economic Models and Predictions in the Regional Management System // *Studies on Russian Economic Development*, 2012. Vol.23, No.1, P. 66–72.
4. Zamyatina M. F. Ecologo-economiceskaya sbalansirovannost regionalnogo razvitiya kak krupnomasshtabnaya innovatsiya [Ekologo-economiceskaya balance of regional development as large-scale innovation] // *Strategiya innovatsion-*

nogo razvitiya regionov Severo-Zapada Rossii: opyt problem [Strategy of innovative development of regions of the Northwest of Russia: experience and problems]. Part 1. SPb.: SPbAME, 2009. P. 319–331.

5. Kurilo A.E., Nemkovich E.G., Senyushkin E.N. Sotsial'no-ekonomicheskie preobrazovaniya v Respublike Karelya (19902005 gg.). [Socio-economic transformations in the Republic of Karelia (19902005)]. Petrozavodsk: KARNZ RAHN, 2007. P. 320.

6. Maksimov V. P., Chadov A.L. Kraevie zadachi ekonomicheskoi dinamiki s priblizennym vypolneniem kraevykh usloviy. Konstruktivnoe issledovanie [Boundary value problems in economic dynamics with approximate fulfilment of boundary conditions. Constructive study] // *Vestnik Permskogo universitete. Ser. Ekonomika* [Perm University Herald. Economy]. 2012. № 3(14). P. 12–17.

7. Maksimov V. P., Chadov A.L. Diskretnoe upravlenie funktsional'no-differentsirovannoy nepreryvno-diskretnoy sistemoy [Discrete control of functional differential continuous-discrete system] // *Vestnik Permskogo universitete. Ser. Ekonomika* [Perm University Herald. Economy]. 2013. № 1(16). P. 6–12.

8. Modelirovanie sotsio-ekologo-ekonomicheskoy sistemy regional' Pod red. V.P. Gurmana, E. V. Pyuminoy [Modeling of sotsio-ekologo-economic system of the region. Under the editorship of. V. P. Gourmet, Ryuminoy E. V.]. M.: Science. 2001. P. 175.

9. *Region Rossii Regions of Russia. Sotsialno-ekonomicheskie pokazateli: sb.st. Rosstat* [Social and economic indicators: sb/ st. / Rosstat]. M.: 2013. P. 990.

10. *Respublica Karelia: statistitseskiy ezhegodnic / Kareliastat Petrozavodsk* [Republic of Karelia: Statistical year-book / Kareliyastat. Petrozavodsk] 2013 . 338 p.

11. Ryumina E.V. Analiz ekologo-ekonomicheskikh [Analysis of ekologo-economic interactions]. M.: Science, 2000. P. 107.

12. Auci S., Becchetti L. The instability of the adjusted and unadjusted environmental Kuznets curves // *Ecological Economics*. 2006. Vol. 60. P. 282–298.

13. He J. What is the role of openness for China's aggregate industrial SO2 emission?: A structural analysis based on the Divisia decomposition method // *Ecological Economics*. 2010. Vol. 69. P. 868–886.

14. Lantz V., Feng Q. Assessing income, population, and technology impacts on CO2 emissions in Canada: where's the EKC? // *Ecological Economics*. 2006. Vol. 57. P. 229–238.

15. Roca J., Serrano M. Income growth and atmospheric pollution in Spain: An input–output approach // *Ecological Economics*. 2007. Vol. 63. P. 230–242.

16. Warr B., Ayres R. Useful work and information as drivers of economic growth // *Ecological Economics*. 2012. Vol. 73. P. 93–102.

17. Wei T. What STIRPAT tells about effect of population and affluence on the environment? // *Ecological Economics*. 2011. Vol. 72. P. 70–74.

18. York R., Rosa E.A., Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts // *Ecological Economics*. 2003. Vol. 46 (3). P. 351–365.