

Для цитирования: Экономика региона. — 2016. — Т.12, вып. 2. — С. 438-450
 doi 10.17059/2016-2-10
 УДК 304.2 : 338.622
 JEL: Q56

И. М. Потравный, А. Л. Новоселов, И. Б. Генгут

Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Москва, Российская Федерация; e-mail: ecoaudit@bk.ru)

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ЗЕЛЕННОЙ ЭКОНОМИКИ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ¹

Предмет статьи — исследование проблем экономико-математического моделирования зеленой экономики на региональном уровне. Цель исследования — обоснование и разработка системы экономико-математических моделей по моделированию развития экономических и экологических систем на региональном уровне на основе принципов зеленой экономики. Гипотезу исследования составляет положение о том, что в условиях истощения природных ресурсов и истощения природного капитала в качестве ресурсной базы современного производства могут рассматриваться техногенные месторождения, отходы производства и потребления, использование которых приводит к ликвидации накопленного экологического ущерба и замещению природных ресурсов.

В статье рассмотрены подходы к решению системы задач моделирования с целью развития зеленой экономики на страновом и региональном уровне. Актуальность перехода к зеленой экономике подтверждена теоретико-практическими исследованиями в области циклического развития социально-эколого-экономических систем. Предложен ряд формализованных моделей и методов решения актуальных эколого-экономических задач (в том числе экономической оценки накопленного экологического ущерба, эколого-экономической оценки эффективности замещения природного ресурса ресурсом-заменителем), а также задачи выбора оптимального набора ресурсов-заменителей с учетом финансовых и природно-ресурсных ограничений.

Рассмотрены типовые модели зеленого роста с учетом истощения природных ресурсов, вовлечения в хозяйственный оборот ресурсов техногенных месторождений на основе реализации инвестиционных проектов по ликвидации накопленного экологического ущерба.

Результаты исследования могут быть использованы в различных регионах страны при обосновании и реализации инвестиционных проектов в рамках осуществления федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2015–2026 гг.

Ключевые слова: зеленая экономика, оценка накопленного экологического ущерба, природно-продуктовые цепочки, замещение минеральных ресурсов, нелинейное программирование, устойчивое развитие, региональные аспекты, истощение ресурсов, накопленный экологический ущерб, эффективность

Введение. Предпосылки разработки формализованной модели зеленой экономики

Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) определяет зеленую экономику как такую экономику, которая повышает благосостояние людей, обеспечивает социальную справедливость и снижает риски для окружающей среды и ее деградации². В широком понимании зеленая экономика — это экономика с низкими выбросами парниковых газов, эффек-

тивно использующая ресурсы и отвечающая интересам всего общества. В научной литературе понятие «зеленая экономика» определяет также экономику, обеспечивающую сохранение, увеличение и восстановление природного капитала. Многие страны используют различные инструменты зеленой экономики в национальной политике и стратегиях развития. Необходимость развития в рамках зеленой экономики осознается во многих странах, в том числе в России. При этом многие развивающиеся страны опасаются, что использование модели зеленой экономики может замедлить процесс их развития.

Рост населения Земли приводит к возращанию добычи и использования невозобновляемых природных ресурсов, например, за последние 100 лет потребление минерально-сырьевых ресурсов увеличилось в 15

¹ © Потравный И. М., Новоселов А. Л., Генгут И. Б. Текст. 2016.

² Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication. Synthesis report for decision-makers // UNEP, 2011. 43 p. [Electronic resource]. URL: www.unep.org/greeneconomy (date of access 05.08.2015).

раз. Структура потребления ресурсов от десятилетия к десятилетию существенно изменяется, в хозяйственное использование вовлекаются новые виды топливно-энергетических ресурсов [1, 2]. В начале нынешнего столетия доля мирового потребления нефти достигла 40 %, углей — 27 %, природного газа — 23 %; на долю атомной энергии, гидроэнергии, солнечной и ветровой приходится 10 %. К 50–60-м гг. XX в. был пройден пик использования угля [3]. С 80-х гг. прошлого века темпы роста потребления нефти существенно снизились [4]. Прогнозы Организации экономического сотрудничества и развития показывают, что при нынешних способах производства и потребления к 2050 г. по сравнению с началом XXI в. мир может лишиться двух третей (от 61 до 72 %) флоры и фауны, а сохранность природных территорий будет необратимо нарушена на 7,5 млн км², что сопоставимо с территорией Австралии. По оценке И. Валлерстайна, абсолютный рост численности населения, объемных показателей производства и богатства за последние 40 лет оказался таким же, как за 400 лет, предшествовавших 1945 г. [5]. При этом процесс использования природного ресурса подчиняется логистической кривой [6].

По подсчетам экспертов Международного энергетического агентства (МЭА), с учетом ожидаемого роста потребления до 2030 г. в мире необходимо найти месторождения нефти в шесть раз большие, чем суммарные запасы месторождений Саудовской Аравии. По итогам комплексного исследования, более 800 нефтяных месторождений, содержащих 75 % мировых запасов, истощены. На большинстве месторождений уже пройдены пиковые значения добычи. В этих условиях становится все более актуальным вопрос о формализации общей модели зеленой экономики с учетом региональной специфики [7, 8].

Постановка проблемы.

Макроэкономические модели истощения ресурсов и перехода к новой экономике

Приведенные выше факты подтверждают справедливость прогноза М. Хубберта, уточненного с помощью математической модели Ж. Лэрье [9], и относительность истощения запасов минерально-сырьевых ресурсов. В качестве основы такой модели [10] используется кривая Ферхюльста (1), которая может быть представлена в виде следующей зависимости:

$$Q_t = \frac{U}{1 + \exp[-b(t - t_m)]}, \quad (1)$$

где Q_t — накопленная добыча в момент времени t ; t — годы; U — накопленные извлекаемые запасы, t_m — точка пика; b — фактор, описывающий наклон (темпы роста добычи). Отметим, что на поздней стадии $t > t_m$, когда рост добычи отрицателен, то есть имеется спад ежегодной добычи, темпы роста добычи остаются положительными.

Исследователи из шведского университета Лунда разработали новую модель мира¹, показывающую истощение основных ресурсов планеты. В соответствии с прогнозами, по этой модели первый пик производства железа произойдет в 2030 г., а вторичный пик — в 2060 г. в ответ на повышение цен и последствия вероятной глобальной рецессии. Затем железо может стать дефицитным ресурсом. Пик производства золота миновал уже в 2000 г., время наступления дефицита — 2070-е гг. Для металлов платиновой группы пик наступит в 2020-е гг., для свинца, серебра, цинка — около 2030 г., для меди, хрома, никеля, молибдена истощение наступит после пика потребления в период 2040–2050 гг. Пик производства фосфоритов пришелся на 2010 г. Время наступления дефицита для фосфора возможно в двух критических точках — в 2040 г.

В 2002–2010 гг. сырьевой индекс *DJ-UBS* (в настоящее время — *Bloomberg Commodity*) вырос на 328 %. В результате произошел структурный сдвиг в модели мирового экономического роста, и цены практически на все сырьевые товары в начале века оказались на дне цикла. Модель, в которой Китай играл роль «мировой фабрики», а развитые страны обеспечивали рост за счет потребительского спроса, сменяется другой: производство и конечное потребление будут более равномерно распределены по земному шару [11, 12].

Наряду с моделями истощения минерально-сырьевых ресурсов, следует обратить внимание на теорию трех циклов Кондратьева, Жюгляра и Китчина, которая была предложена Й. Шумпетером. В соответствии с данным подходом, итоговая кривая экономического развития может быть представлена в виде суммы колебательных процессов с различной частотой относительно трендовой траектории развития, которая называется «великим объединением». Наложение негативных тенденций этих циклов наступило во время Великой депрессии. Современные исследования подтверж-

¹ См. <https://goldenfront.ru/articles/view/nashim-vnukam-tochno-ne-hvatit> (дата обращения 5.08.2015).

Таблица 1

«Великие циклы» и технологические уклады

Номер цикла	Период, годы		Технологические уклады
	Начало	Окончание	
1	1803	1841–1843	текстильные фабрики, промышленное использование каменного угля
2	1844–1851	1890–1896	угледобыча и черная металлургия, железнодорожное строительство, паровой двигатель
3	1891–1896	1945–1947	тяжелое машиностроение, электроэнергетика, неорганическая химия, производство стали и электрических двигателей
4	1945–1947	1981–1983	производство автомобилей и других машин, химическая промышленность, нефтепереработка и двигатели внутреннего сгорания, массовое производство
5	1981–1983	~2018	развитие электроники, робототехники, вычислительной, лазерной и телекоммуникационной техники;
6	~2018	~2060	предположительно, NBIC конвергенция (конвергенция нано-, био-, информационных и когнитивных технологий)

Составлено по данным: Акаев А. А. Современный финансово-экономический кризис в свете теории инновационно-технологического развития экономики и управления инновационным процессом // Системный мониторинг. Глобальное и региональное развитие. М.: УРСС, 2009. С. 141–162; Коротаев А. В., Цирель С. В. Кондратьевские волны в мировой экономической динамике // Системный мониторинг. Глобальное и региональное развитие / Ред. Д. А. Халтурина, А. В. Коротаев. М.: URSS, 2009. С. 189–229.

дают и уточняют сроки рассматриваемых циклов [13, 14]. Расчеты специалистов, долгое время занимавшихся исследованием длинных волн [15–17], показывают, что депрессия продлится до 2017–2018 гг., затем начнется подъем в рамках 6-го технического уклада в период с 2018 по 2040 г. (табл. 1).

Практические усилия по переходу в шестой технологический уклад и зеленая экономика

На рубеже начала шестого «великого цикла» появилась концепция зеленой экономики, важнейшей задачей которой является преодоление проблемы исчерпания природных ресурсов. Среди причин вовлечения в хозяйственную деятельность нетрадиционных видов энергии [18–20] можно выделить решающие:

- рост затрат и цен на традиционные энергоресурсы [18];
- сокращение разведанных запасов природных ресурсов [15];
- необходимость утилизации накопленных отходов с наибольшей выгодой.

В основе динамики цен на истощаемые природные ресурсы лежит правило Хотеллинга: оптимальность добычи ресурса достигается, если цена единицы остающегося ресурса растет темпами, равными текущей процентной ставки [21, 22]. Несмотря на колебания цен, которые неизбежно возникают под действием нерыночных факторов, генеральная динамика цен демонстрирует их рост для всех видов истощаемых природных ресурсов. По данным из долгосроч-

ных прогнозов¹, мировая цена сырой нефти к 2030 г. может составлять от 50 до 200 долл/барр. при средней оценке 125 долл/барр. В качестве первого на очереди природного ресурса, подлежащего замещению, мировое сообщество рассматривает нефть. В качестве практических шагов по решению этой задачи следует упомянуть программы ряда стран, которые направлены на реализацию зеленой экономики на национальном уровне. Так, шведское правительство предусматривает полный отказ от углеводородного топлива и избавление страны от нефтяной зависимости (*oil-freenation*) до 2020 г.² Бразилия планирует перевести 80 % транспорта на биотопливо из сахарного тростника. В Японии сформирована «Программа действий низкоуглеродного общества», в рамках важнейшим индикатором является снижение уровня выбросов углерода. В США реализуется Национальная программа по энергосбережению (National Action Plan for Energy Efficiency). План «Чистая энергия», принятый в США в 2015 г., ставит цель сокращения выбросов парниковых газов электростанциями почти на треть в течение следующих 15 лет, а также предусматривает развитие альтернативной энергетики, в основном солнечной и ве-

¹ International Energy Agency. «World Energy Outlook 2011. Are We Entering a Golden Age of Gas?» [Electronic resource] URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/goldenageofgas/> (21.08.2015); IEA World Energy Outlook 2008, Alternative Policy Scenario. http://www.ren21.net/Portals/0/GFR_Scenario_Profiles_draft_Jan16.pdf (date of accesse 12.08.2015).

² См. <http://geosfera.info/evropa/shveciya/208-shveciya-zelenaya-yekonomika.html> (дата обращения 12.08.2015).

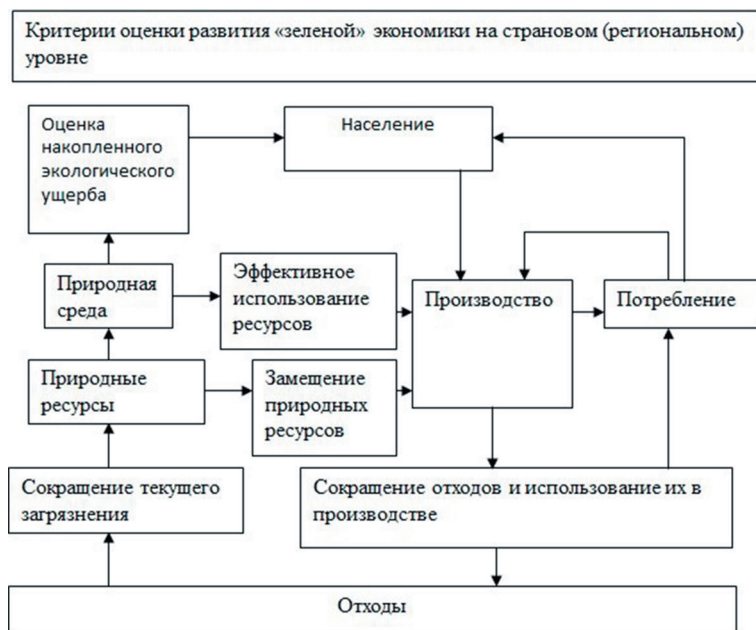


Рис. Природно-продуктовая модель региона (страны) с основными задачами развития зеленой экономики

тровой. В Китае низкоуглеродная экономика объявлена на официальном уровне главной стратегической задачей страны для получения преимуществ в экономике будущего.

Система задач повышения эффективности зеленой экономики

Перечисленные направления действий ведущих стран мира следует считать, безусловно, полезными [23]. Однако их концепции и программы базируются на документах, которые во многом несут политический характер. С целью разработки сбалансированной политики перехода к зеленой экономике необходимо создание формализованных критериев оценки и построение системы экономико-математических моделей, позволяющих провести эколого-экономический анализ существующей ситуации, определить оптимальные управленческие решения и выбрать наилучшие варианты их реализации.

На рисунке представлен общий вид природно-продуктовой модели, в которой прямоугольниками показаны экономико-производственные процессы, место в них населения региона (страны), а стрелками представлены материальные и трудовые потоки.

Природно-продуктовую модель венчает задача разработки критериев оценки развития зеленой экономики. На данной природно-продуктовой модели представлены основные математические задачи, которые должны быть поставлены и решены с целью перехода к зеленой экономике.

В настоящее время в России выделяют 10 сегментов инвестирования ресурсов в природно-

пользование и охрану окружающей среды. К ним отнесены сельское и лесное хозяйство, водное хозяйство, рыболовство, ЖКХ, энергетика, промышленность, туризм, транспорт, утилизация и переработка отходов. Однако во многих странах мира энергетика рассматривается в качестве точки зеленого роста национальной экономики в целом. Это связано, прежде всего, с истощением запасов углеводородных ресурсов и выбросами парниковых газов. Зеленая экономика в энергетическом секторе предполагает использование энергоэффективных технологий, а также экологически чистых низкоуглеродных источников энергии, развитие альтернативной энергетики. Эта проблема отражена в задачах эффективного использования природных ресурсов и замещении истощаемых природных ресурсов ресурсами-заменителями.

Экономическая деятельность привела к накоплению загрязнений — прошлому ущербу, который в настоящее время оказался столь велик, что начиная с последней четверти XX в., правительства развитых стран начинают работы по ликвидации накопленных загрязнений. Еще в 1980 г. в США был принят закон «О принятии всеобъемлющих мер по охране окружающей среды, выплате компенсаций и ответственности» (CERCLA — Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act)¹. В результате реализации дан-

¹ См. http://ecodelo.org/o_nakoplennom_ekologicheskom_ushcherbe_i_potentsiale_v_baikalskom_regione_problemy_i_vozmozhnosti_lik (дата обращения 5.08.2015).

ного закона был создан суперфонд, за счет которого решались крупные экологические проблемы ликвидации прошлого ущерба (например, ликвидация прошлого ущерба Великих озер). В 2011 г. Минприроды России отобрало 194 первоочередных региона, в которых необходимо ликвидировать накопленный экологический ущерб. Разработана федеральная целевая программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 гг. Уже сейчас реализуются пилотный проект по очистке Земли Франца-Иосифа от накопленного загрязнения. При этом до настоящего времени не разработаны методические рекомендации по расчету экономической оценки прошлого ущерба. Замещение дефицитных природных ресурсов ресурсами-заменителями требует создания комплекса моделей, которые позволят провести оценку экономической целесообразности замещения и найти оптимальные варианты использования ресурсов-заменителей. Рассмотрим приведенные задачи более подробно.

Критерии развития в рамках зеленой экономики

Анализ устойчивого развития на страновом уровне в настоящее время основывается на индикаторах для анализа и прогноза экологической ситуации. Системы индикаторов устойчивого развития имеют фактически все крупнейшие международные организации (ООН, Всемирный Банк, Организация экономического сотрудничества и развития, Европейское экономическое сообщество и др.) и развитые страны (см., например [24, 25]). Для оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации в 2007 г. разработана система из 43 основных и 39 дополнительных индикаторов по основным сферам, характеризующим уровень социально-экономического развития региона. В этом же году Министерством экономики и торговли РФ был подготовлен список «Показатели эффективности деятельности органов государственной власти субъектов Российской Федерации», включающий более 130 индикаторов [17, 18]. Индикаторы, которые могут быть использованы на региональном уровне, представлены в [28, 29].

Использование системы индикаторов для сопоставления и анализа затруднено в силу большой размерности. С этой точки зрения большой интерес представляют стоимостные показатели. Одним из первых таких показателей является разработанный профессором

К. Гофманом (ЦЭМИ РАН) показатель «долг перед природой». Государственным управлением по охране окружающей среды КНР был разработан показатель зеленого ВВП, который рассчитывается с 2004 г. Всемирный банк и ООН проводят поиск агрегированных критериев, которые основываются на стоимостном измерении. К числу таких критериев относятся предложенный статистическим отделом ООН критерий экологически адаптированного чистого внутреннего продукта (*EDP* — *Environmental adjusted net domestic product*), который определяется по формуле (2):

$$EDP = (NDP - DPNA) - DGNA, \quad (2)$$

где *NDP* — чистый внутренний продукт; *DPNA* — стоимостная оценка истощения природных ресурсов; *DGNA* — стоимостная оценка экологического ущерба.

Всемирным банком был разработан более интересный показатель — истинный сбережений (*GS* — *genuine (domestic) savings*):

$$GS = (GDS - CFC) + EDE - DPNR - DMGE, \quad (3)$$

где *GDS* — валовые внутренние сбережения; *CFC* — величина обесценивания произведенных активов; *EDE* — затраты на образование; *DPNR* — величина истощения природных ресурсов; *DMGE* — ущерб от загрязнения окружающей среды. Последний из рассмотренных показателей (3) может быть использован в качестве глобального критерия перехода к зеленой экономике: $GS \rightarrow \max$. Этот показатель можно представить в форме векторного критерия оптимальности, если разделить экономическую и природно-ресурсную составляющие и рассматривать их как равноценные критерии:

$$\begin{cases} f_1 = (GDS - CFS) + EDE \rightarrow \max, \\ f_2 = DPNR + DMGE \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Использование векторного критерия (4) позволяет находить компромиссные по Парето решения для сбалансированного перехода к зеленой экономике.

Модель экономической оценки прошлого (накопленного) ущерба от загрязнения окружающей среды

На величины прошлых ущербов одновременно влияют два фактора: геофизический и экономический. Геофизический фактор, или абсорбция (ассимиляционный потенциал) — это естественный ресурс природной территории. Абсорбция отражает способность природной территории или акватории без саморазрушения и потери устойчивости разлагать при-

родные и антропогенные вещества и устранять их вредное воздействие. В то же время, помимо постоянного снижения величины ущерба, происходит обратное действие, обусловленное экономическим фактором. В связи с тем, что рассматривается экономическая оценка ущерба, текущие величины ущербов из-за инфляционных процессов с течением времени постоянно увеличиваются. Одновременно происходит два разнонаправленных процесса, один из которых увеличивает прошлый экологический ущерб, а другой — снижает [20].

Таким образом, величину накопленного экологического ущерба с учетом абсорбции и инфляции можно рассчитать следующим образом:

$$Y_t = \sum_{\tau=t}^T (Y_{\tau(t)} \times a^{\tau-t} \times (1+r)^{T-\tau}), \quad (5)$$

где Y_t — причиненный за год t ущерб, приведенный с учетом влияния на его величину абсорбции и инфляции к конечному году T ; $Y_{\tau(t)}$ — величина накопления ущерба, рассчитанная в рамках рассматриваемого года t на каждый последующий момент времени τ ; a — коэффициент абсорбции (ассимиляционный потенциал); r — коэффициент дисконтирования (равный банковской ставке рефинансирования года T); t — год в рамках периода накопления ущерба, $t = t_0, T$; τ — период в рамках года t , $\tau = t, T$; t_0 — год, принимаемый за исходный (с которого начал накапливаться ущерб); T — год, принимаемый за конечный (для которого рассчитывается прошлый ущерб).

Для получения окончательной величины накопленного экологического ущерба по всем годам t (с года t_0 по год T) необходимо просуммировать накопленный на каждый момент времени t экологический ущерб (5) по всем годам: $Y_{\text{накопл.}} = \sum_{t=t_0}^T Y_t$. Таким образом, общая ве-

личина накопленного экологического ущерба в результате прошлой хозяйственной деятельности за все рассматриваемые годы можно рассчитать по формуле:

$$Y_{\text{накопл.}} = \sum_{t=t_0}^T \sum_{\tau=t}^T (Y_{\tau(t)} \times a^{\tau-t} \times (1+r)^{T-\tau}). \quad (6)$$

Данный метод экономической оценки прошлого ущерба (6) был впервые использован на практике при разработке федеральной целевой программы «Социально-экологическая реабилитация территории и охраны здоровья населения г. Чапаевска Самарской области» (1996 г.). В 2013 г. этот же метод был ис-

пользован для оценки накопленного экологического ущерба для островов архипелага Земля Франца-Иосифа при подготовке Программы и проекта по ликвидации источников негативного воздействия на загрязненных территориях островов архипелага Земля Франца-Иосифа до 2020 г. Проведенная апробация продемонстрировала практическую пригодность приведенного метода для экономической оценки накопленного экологического ущерба при разработке и эколого-экономическом обосновании федеральных и региональных программ, в частности, возможность использования данного подхода для обоснования и реализации инвестиционных проектов в рамках реализации федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2015–2026 гг.

Модель экономической оценки эффективности замещения природного ресурса

Замещение ресурсов при производстве продукции приводит к изменению набора экономических, экологических и социальных факторов. В области экономики — к изменению затрат и, как следствие, цен. В области экологии — к ущербу от загрязнения при добыче, эксплуатации и утилизации. Социальное восприятие замещения ресурсов осложняется инерционностью и включает имиджевый аспект: использование заменителя трактуется как более низкий класс продукции. В то же время, снижение цен на продукцию из заменителя для потребителя представляет немалый интерес.

В таблице 2 представлена природно-продуктовая вертикаль для традиционного производства, основанного на добыче природного ресурса (например, нефти). Природно-продуктовая цепочка расширена за счет раскрытия факторов, обеспечивающих ущерб (затраты) и выгоды трех сторон — природной среды, потребителей конечной продукции и производителей, которые реализуют добычу и переработку природного сырья вплоть до получения конечной продукции. При замещении природных ресурсов факторы, которые воздействуют на ущерб (затраты), и выгоды в рассматриваемой природно-продуктовой вертикали меняют величины. Более того, как следствие замещения природного ресурса другим видом ресурса, в том числе искусственным аналогом, могут появляться новые факторы и новые заинтересованные стороны.

Индексы, приведенные в таблице 2 ($j = 1, n_j$; $k = 1, n_k$; $i = 1, n_i$), позволяют компактно пред-

Таблица 2

Структуризация природно-продуктовой вертикали при традиционном подходе

Фактор потерь (затрат), $j = 1, n_j$			Звено природно-продуктовой вертикали, $k = 1, n_k$	Фактор выгод, $i = 1, n_i$		
Природная среда	Потребитель	Производитель		Природная среда	Потребитель	Производитель
Ущерб	Затраты на утилизацию	Затраты на утилизацию	Утилизация продукции	Сохранение природной среды	Использование рекреационного потенциала	—
Истощение ресурсов; ущерб	Затраты на эксплуатацию	—	Использование продукции	—	Выгоды от использования	—
Истощение ресурсов; ущерб	—	Затраты на производство	Изготовление продукции	—	—	Продажа продукции
Истощение ресурсов; ущерб	—	Затраты на добычу	Добыча и/или использование природного ресурса	—	—	Продажа ресурса

ставить комплексную оценку эффективности реализации природно-продуктовой вертикали. Если затраты (ущерб) j -й стороны для k -го звена природно-продуктовой вертикали обозначить Z_{kj} , а выгоды i -й стороны для k -го звена природно-продуктовой вертикали обозначить P_{ki} , то комплексная оценка эффективности с учетом фактора времени будет рассчитываться по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^{n_k} \left(\sum_{i=1}^{n_i} P_{ki} - \sum_{j=1}^{n_j} Z_{kj} \right) \right] (1+r)^{1-t}. \quad (7)$$

Формула (7) является базовой для оценки экономической эффективности природно-продуктовой вертикали. Если сопоставляются существующий вариант использования природного ресурса с замещающим ресурсом, то следует предварительно оценить изменение затрат (ущерба) ΔZ_{kj} и выгоды ΔP_{ki} , тогда оценка замещения будет оцениваться по формуле (8):

$$NPV = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^{n_k} \left(\sum_{i=1}^{n_i} \Delta P_{ki} - \sum_{j=1}^{n_j} \Delta Z_{kj} \right) \right] (1+r)^{1-t}. \quad (8)$$

На процесс замещения природных ресурсов оказывают влияние такие факторы, как рост цен и затрат на добычу и переработку природного ресурса, несоответствие объемов добычи потребностям экономики, наличие возможностей удовлетворения потребностей в ресурсе за счет ресурса-замениителя [31]. В общем виде, если NPV_1 — чистый дисконтированный доход от ресурса-замениителя, а NPV_0 — чистый дисконтированный доход от добычи (эксплуатации) природного ресурса, то условие экономической целесообразности замещения природ-

ного ресурса ресурсом-заменителем следует записать в виде $E = NPV_1 - NPV_0 > 0$ [32]. Для анализа влияния внешних и внутренних факторов на экономическую целесообразность замещения природных ресурсов рекомендуется воспользоваться моделью разложения эффективности замещения ресурса по факторам без остатка и использовать такие методы решения данной задачи, как метод цепных подстановок, метод полных перестановок или логарифмический метод [33].

Модель оценки технологической реализуемости замещения природного ресурса

В приведенном выше условии эффективности замещения природного ресурса не учитывается технологическая реализуемость технологии замещения. В таких условиях оценку эколого-экономической эффективности целесообразно проводить с использованием реальных опционов (*ROV — RealOptionValue*). Для расчета следует использовать европейский опцион-*call*, поскольку горизонт расчета при использовании традиционного и замещающего варианта одинаков и равен T . При этом можно рассматривать чистый дисконтированный доход от использования замещающего природного ресурса как опцион расширения [22].

Стоимость опциона можно определить по формуле: $ROV_i = NPV_i^{\text{exp}} - NPV_0$, где NPV_i^{exp} — ожидаемое (*expected*) значение NPV_i , которое рассчитывается по формуле Гурвица (9):

$$NPV_i^{\text{exp}} = \lambda \times NPV_i + (1-\lambda) \times NPV_0, \quad (9)$$

Подготовку программ замещения и ресурсосбережения целесообразно осуществ-

влять из реализации таких вариантов замещения природного газа, для которых, по крайней мере, стоимость опциона больше нуля, то есть $NPV_i^{\text{exp}} > 0$.

Модель оптимального замещения природного ресурса

Предлагается общая модель оптимального выбора вариантов замещения природного ресурса в объеме P^0 несколькими альтернативными вариантами $i = 1, 2, \dots, n$, каждый из которых позволяет заменить дефицитный ресурс в объеме P_i . Поскольку в общем случае $P_i < P^0$, необходимо сформировать оптимальный набор видов ресурсов-заменителей. Для такого выбора необходимо воспользоваться искомыми переменными U_i , принимающими значение 1, если i -й ресурс-заменитель выбирается для замещения дефицитного природного ресурса, или 0, если i -й ресурс-заменитель не выбирается для замещения дефицитного природного ресурса. Тогда ограничение по замещению природного ресурса в полном объеме будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n P_i U_i \geq P^0. \quad (10)$$

Поскольку объем финансирования на реализацию проектов замещения дефицитного природного ресурса ограниченны и равны B , а затраты на реализацию i -го проекта Z_i , то ограничение по финансированию может быть представлено следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n Z_i U_i \leq B. \quad (11)$$

Поскольку проекты замещения природных ресурсов могут потребовать дополнительных земельных ресурсов S_i (например, ветровая и солнечная энергетика приводят к изъятию земельных ресурсов из хозяйственного оборота), то можно потребовать, чтобы было соблюдено ограничение по предельному изъятию земельных ресурсов в объеме S^0 :

$$\sum_{i=1}^n S_i U_i \leq S^0. \quad (12)$$

Можно также учесть ограничение по предельной величине экономической оценки ущерба окружающей среде Y_0 при реализации проектов замещения, если при реализации i -го проекта экономическая оценка причиняемого ущерба окружающей среде составляет Y_i , а экономическая оценка ущерба окружающей среде при добыче замещаемого природного ресурса составляет Y^1 :

$$\sum_{i=1}^n Y_i U_i \leq Y^0 - Y^1. \quad (13)$$

Если проводить поиск оптимального набора вариантов замещения (проектов) по критерию максимизации чистого дисконтированного дохода (NPV), то целевая функция задачи будет иметь вид:

$$F(U) = \sum_{i=1}^n NPV_i U_i \rightarrow \max. \quad (14)$$

В результате решения задачи (10–14) будет получен вариант замещения природного ресурса набором из нескольких видов ресурсов (проектов), которые обеспечат максимум прибыли на горизонте расчета чистого дисконтированного дохода. Однако стремление к зеленой экономике требует равноценного учета экономических и экологических интересов. Для этого в модели выбора оптимальных проектов замещения природного ресурса целесообразно одновременно оптимизировать два критерия: экономический $F_1(U)$ (максимизацию суммарной прибыли или чистого дисконтированного дохода) и экологический $F_2(U)$ (минимизацию суммарного ущерба окружающей среде):

$$F_1(U) = \sum_{i=1}^n NPV_i U_i \rightarrow \max \quad (15)$$

и

$$F_2(U) = \sum_{i=1}^n Y_i U_i \rightarrow \min. \quad (16)$$

При ограничениях, которые были рассмотрены ранее, за исключением ограничения по предельному ущербу, причиняемому окружающей среде:

$$\sum_{i=1}^n Z_i U_i \leq B, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i U_i \geq P^0, \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i U_i \leq S^0. \quad (19)$$

В экологический критерий (16) целесообразно добавить наряду с составляющей экономической оценки ущерба окружающей среде, включить составляющую истощения природных ресурсов, в частности, земельных:

$$F_2(U) = \sum_{i=1}^n (Y_i + CS_i) U_i \rightarrow \min. \quad (20)$$

Еще более полным учет природно-ресурсной и экологической составляющих будет в том случае, если их сумма (20) будет соотнесена с тем объемом ресурсов, которые замещаются выбранными проектами:

$$F_2(U) = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i + CS_i)U_i}{\sum_{i=1}^n P_i U_i} \rightarrow \min. \quad (21)$$

В результате получена задача многокритериальной оптимизации с линейным (20) и дробно-линейным (21) критериями. Для того чтобы решить данную задачу необходимо, прежде всего, провести масштабирование критериев задачи, то есть привести их к одной размерности, одному направлению оптимизации и единому диапазону изменения. Масштабирование критериев целесообразно проводить с помощью следующего преобразования:

$$\omega_l(U) = \begin{cases} \frac{F_l^{\max} - F_l(U)}{F_l^{\max} - F_l^{\min}}, & l \in L^{\max}, \\ \frac{F_l(U) - F_l^{\min}}{F_l^{\max} - F_l^{\min}}, & l \in L^{\min}. \end{cases} \quad (22)$$

где $L^{\max}$ ($L^{\min}$) — множество максимизируемых (минимизируемых) критериев; $F_l^{\max}$ ($F_l^{\min}$) — максимальное (минимальное) значение l -го критерия в пределах области допустимых решений, образованной приведенными выше ограничениями.

Отыскание $F_l^{\max}$ и $F_l^{\min}$ значений для критериев $l \in L = L^{\max} \cup L^{\min}$ следует провести на основе решения задач локальной оптимизации не зависимо от экономического содержания критериев. Решение задач локальной оптимизации может быть получено с помощью метода Балаша, метода Лемке и Шпильберга [34] или метода управляемого случайного поиска Пятецкого — Шапиро, Волконского, Левиной и Поманского [35].

Многокритериальная оптимизация должна привести к решению из области Парето, компромиссному решению по Парето. Для того чтобы найти такое решение, требуется провести свертку отмасштабированных критериев на основе принципа справедливой уступки Чебышева:

$$\max \{\omega_1(U); \omega_2(U)\} \rightarrow \min. \quad (23)$$

Целевая минимаксная функция (23), реализующая принцип справедливой уступки Чебышева, гарантирует получение решения из области компромисса по Парето. При этом будет достигнуто выполнение условия: $\omega_1(U) = \omega_2(U) + \delta$, где $|\delta| > 0$ — предельно возможная точность, с которой будет выполнено указанное условие в силу того, что искомые переменные являются булевыми. Для получе-

ния численного решения необходимо перейти от минимаксной целевой функции задачи к виду, соответствующему задаче математического программирования. С этой целью следует ввести в рассмотрение переменную V , которая имеет смысл максимального из отклонений рассматриваемых критериев от локального оптимума.

$$V = \max \{\omega_1(U); \omega_2(U)\}. \quad (24)$$

Тогда можно построить задачу (25–30) нелинейного программирования с булевыми переменными, эквивалентную записанной выше свертке критериев:

$$V \rightarrow \min, \quad (25)$$

$$V \geq \omega_l(U), \quad l \in L = L^{\max} \cup L^{\min}, \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n Z_i U_i \leq B, \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i U_i \leq S^0, \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i U_i \geq P^0, \quad (29)$$

$$U_i = \begin{cases} 1, & i = 1, 2, \dots, n. \\ 0, & \end{cases} \quad (30)$$

Для отыскания решения приведенной задачи (25–30) следует воспользоваться модификацией метода сжимающегося симплекса [36] применительно к особенностям задачи векторной оптимизации с булевыми переменными. Суть метода состоит в поиске оптимального значения целевой функции V^* на интервале от нуля до единицы путем деления этого отрезка пополам. Заметим, что при $V = 1$, система ограничений всегда совместна, а при $V = 0$ — заведомо несовместна. Действительно, если бы при значении $V = 0$, то есть тогда, когда все критерии принимают оптимальное значение, система ограничений была бы совместна, то ресурсов хватало бы на то, чтобы наилучшим образом удовлетворить все цели своего развития и вопроса о компромиссе между этими критериями не стояло бы. Эта ситуация противоречит экономическому смыслу рассматриваемой проблемы.

В методе деления пополам, реализуемом для решения поставленной задачи на исходной итерации $k = 0$, полагаем $V_0^c = 1$ и при $V_0^h = 0$ (индексами с обозначаются в дальнейшем такие значения V_k , при которых система ограничений совместна, а индексом n — при которых система ограничений несовместна). Новое значение V_k на итерации k определяется по формуле (31):

$$V_k = (V_{k-1}^c - V_{k-1}^n) / 2, \quad (31)$$

после чего с помощью симплекс-метода определяется индекс, которым отмечают полученное значение V_k . Переменная с противоположным индексом на итерации k получает то же значение, которое она имела на предыдущей итерации. Процесс поиска продолжается до тех пор, пока не выполнится условие (32):

$$|V_{k-1}^c - V_k^c| \leq \xi, \quad (32)$$

где ξ — заданная точность расчета, $\xi > 0$.

Заключение

Представленные модели и методы позволяют осуществить формализацию наиболее

важных задач оценки, анализа и планирования перехода к зеленой экономике. В настоящее время в Российском экономическом университете им. Г.В. Плеханова проводятся работы по решению комплекса задач выбора стратегических направлений развития зеленой экономики на страновом и региональном уровне, учета эколого-экономических рисков [37], прогнозирования социальных и эколого-экономических последствий использования ресурсов-заменителей с учетом роста дефицита природных ресурсов, изменения цен на природные ресурсы, обеспечения ресурсной безопасности страны и других факторов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского гуманитарного научного фонда (РГНФ), проект № 14-02-00235а.

Список источников

1. Еремин Н. И., Дергачев А. Л. Экономика минерального сырья. — М.: Университет, 2007. — 504 с.
2. Крапчин И. П., Кудинов Ю. С. Уголь сегодня, завтра. Технология, экология, экономика. — М.: Новый век, 2001. — 216 с.
3. Козловский Е. А., Комаров М. А., Макрушин Р. Н. Недропользование СНГ в условиях глобализации. — М.: Геоинформмарк, 2007. — 294 с.
4. Миловидов К. Н., Коржубаев А. Г., Эдер Л. В. Нефтегазообеспечение глобальной экономики: учеб. пособие. — М.: Центрлитнефтегаз, 2006. — 603 с.
5. Валлерстайн И. Миросистемный анализ. Введение. — М.: Территория будущего, 2006. — 247 с.
6. Новоселова И. Ю. Теоретико-практические аспекты истощения природных ресурсов и их замещение // Вестник университета. — 2014. — № 4. — С. 125–129.
7. Atkinson G., Hamilton K. Progress along the Parth: Evolving Issues in measurement of genuine saving // Environmental and Resource Economics. — 2007. — Vol. 37. — P. 43–61.
8. Hamilton K., Hartwick J. M. Investing Exhaustible Resource Rents and the Parth of Cosumption // Canadian Journal of Economics. — 2005. — Vol. 38. — P. 615–621.
9. Модели и прогнозные оценки перспектив добычи нефти / Поляков Г.А [и др.]. — М.: РОССПЭН, 2004. — 151 с.
10. Новоселов А. Л., Медведева О. Е., Новоселова И. Ю. Экономика, организация и управление в области недропользования. — М.: Юрайт, 2014. — 632 с.
11. Torvik R. Why do some resource-abundant countries succeed while others do not? // Oxford Review of Economic Policy. — 2009. — Vol. 25, Number 2. — pp. 241–256.
12. Van der Ploeg F. Natural Resources: Curse or Blessing? // Journal of Economic Literature. — 2011, vol. 49:2. — pp. 366–420.
13. Акаев А. А., Рудской А. И. Анализ и прогноз влияния шестого технологического уклада на динамику мирового экономического развития // Мировая динамика. Закономерности, тенденции, перспективы. — М.: ЛИБРОКОМ, 2013. — С. 142–166.
14. Глазьев С. Ю., Харитонов В. В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике. — М.: Тривант, 2009. — 304 с.
15. Гринин Л. Е., Коротаев А. В. Глобальный кризис в ретроспективе. Краткая история подъемов и кризисов. От Ликурга до Алана Гринспена. — 2-е изд. — М.: Либроком, 2012. — 336 с.
16. Меньшиков С. М., Клименко Л. А. Длинные волны в экономике. Когда общество меняет кожу. — 2-е. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 276 с.
17. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю. — М.: ИСПИ РАН, 2012. — 359 с.
18. Эндрес А., Квернер И. Экономика природных ресурсов. Рынки, технологии и инновации. — М.: Питер, 2004. — 256 с.
19. Asheim G. Green National Accounting for Welfare and Sustainability: a Taxonomy of Assuptions and Results // Scottish Journal of Political Economy. — 2003, vol. 59. — pp. 113–130.

20. Hamilton K. Green Adjustments to GDP // Resources Policy. — 1994. — vol. 20(3). — pp. 155–168.
21. Голуб А. А., Струкова Е. Б. Экономика природных ресурсов. — М.: Аспект Пресс, 1999. — 319 с.
22. Hotelling H. The Economics of Exhaustible Resources // Journal of Political Economy. — 1931. — vol. 39.2. — pp. 137–175.
23. Hamilton K., Withaget C. Saving growth and the path of utility // Canadian Journal of Economics. — 2007. — vol. 40(2). — pp. 703–713.
24. The pan-European environment: glimpses into uncertain future. Copenhagen: European Environment Agency. — 2007. — 75 p.
25. Arrow K. J., Dasgupta P., Maler K.-G. Evaluating Projects and Assessing Sustainable Development in Imperfect Economies // Environmental and Resource Economics. — 2003. — vol. 26. — pp. 647–685.
26. Бобылев С. Н. Индикаторы устойчивого развития. Региональное измерение. — М., Акрополь, 2007. — 60 с.
27. Устойчивое развитие. Методология и методики измерения / Бобылев С. Н., Зубаревич Н. В., Соловьева С. В., Власов Ю. С. М.: Экономика, 2011. — 360 с.
28. Экологические индикаторы качества роста региональной экономики / под ред. И. П. Глазыриной и И. М. Потравного. — М.: НИИ-Природа, РЭФИА, 2005. — 306 с.
29. Spangenberg J. H. Economic sustainability of the economy: concepts and indicators // International Journal of Sustainable Development. — 2005. — Vol. 8. — pp. 47–64.
30. Новоселов А. Л. Экономика природопользования. — М.: Академия, 2012. — 240 с.
31. Новоселова И. Ю. Моделирование влияния внешних факторов на замещение природных ресурсов // Экономика природопользования. — 2015. — № 2. — с. 25–33.
32. Новоселова И. Ю., Лобковский В. А. Эколого-экономический анализ возможностей использования альтернативных природных ресурсов в регионе // Проблемы региональной экологии. — 2015. — № 1. — с. 75–80.
33. Новоселов А. Л. Один подход к анализу влияния факторов на эффективность замещения природных ресурсов в энергоснабжении // Экономика природопользования. — 2014. — № 5. — С. 70–76.
34. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций. — М.: Мир, 1977. — 432 с.
35. Финкельштейн Ю. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. — М.: Наука, 1976. — 265 с.
36. Новоселов А. Л., Новоселова И. Ю. Модели и методы принятия решений в природопользовании. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. — 383 с.
37. Тихомиров Н. П., Потравный И. М., Тихомирова Т. М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. — 350 с.

Информация об авторах

Потравный Иван Михайлович — доктор экономических наук, профессор кафедры управления проектами и программами, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: ecoaudit@bk.ru).

Новоселов Андрей Леонидович (Москва, Россия) — доктор экономических наук, профессор кафедры математических методов в экономике, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: alnov2004@yandex.ru).

Генгут Игорь Борисович (Самара, Россия) — кандидат экономических наук, докторант кафедры управления проектами и программами, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: igengut@gmail.com).

For citation: Ekonomika regiona [Economy of Region], — 2016. — № 2. — pp. 438–450

I. M. Potravny, A. L. Novoselov, I. B. Gengut

Plekhanov Russian University of Economics (Moscow, Russian Federation; e-mail: ecoaudit@bk.ru)

Formalization of the General Model of the Green Economy at the Regional Level

The subject-matter of the article is the research of the problems of economic and mathematical modelling of the green economy at the regional level. The purpose of the research is the substantiation and development of economic and mathematical tools for the modelling of economic and ecological systems at the regional level on the basis of the principles of the green economy. The hypothesis of the study is based on the thesis that in the conditions of the resource exhaustion and depletion of natural capital, the technogenic deposits as well as production waste and consumption can be considered as the resource base for modern production, whose use leads to the elimination of accumulated environmental damage and substitution of natural resources. In the article, the approaches to the system modelling problems are considered to develop the green economy at the level of the country and its regions. The relevance of the transition to a green economy is confirmed by the theoretical and practical research in the field of the cyclic development of socio-eco-economic systems. A number of formalized models and methods for solving current environmental-economic issues including the economic valuation of accumulated environmental damage, eco-economic assessment of the efficiency of natural resource substitution with resource-substitute are proposed as well as the choice of an optimal set of resources-substitutes taking into account the financial and natural resource constraints. The standard models of green growth are considered. These models take into account the exhaustion of natural resources, involvement of

the resources of technogenic deposits in the economic circulation through the implementation of investment projects on the elimination of accumulated environmental damage. The results of the study may be used in the different regions of the country for the justification and implementation of investment projects in the framework of the Federal Target Program "Elimination of accumulated environmental damage" for 2015–2026.

Keywords: green economy, valuation of accumulated environmental damage, natural food chain, substitution of mineral resources, nonlinear programming, sustainable development, regional aspects, depletion of resources, accumulated environmental damage, effectiveness

Acknowledgements

The research has been supported by the Grant of the Russian Foundation for Humanities, Project № 14–02–00235a.

References

1. Eremin, N. I. & Dergachev, A. L. (2007). *Ekonomika mineralnogo syrya [Economics of mineral raw materials]*. Moscow: Universitet Publ., 504.
2. Krapchin, I. P. & Kudinov, Yu. S. (2001). *Ugol segodnya, zavtra. Tekhnologiya, ekologiya, ekonomika [Coal today and tomorrow. Technology, ecology, economy]*. Moscow: Novyy vek Publ., 216.
3. Kozlovskiy, E. A., Komarov, M. A. & Makrushin, R. N. (2007). *Nedropolzovanie SNG v usloviyakh globalizatsii [Subsoil use of the CIS in the context of globalization]*. Moscow: Geoinformmark Publ., 294.
4. Milovidov, K. N., Korzhubayev, A. G. & Eder, L. V. (2006). *Neftegazobespechenie globalnoy ekonomiki: ucheb. posobie [Oil and gas supply in global economy: textbook]*. Moscow: Tsentrlnftegaz Publ., 603.
5. Wallerstein, I. (2006). *Mirosistemnyy analiz. Vvedenie [World-systems analysis: an introduction]*. Moscow: Territoriya budushchego Publ., 247.
6. Novoselova, I. Yu. (2014). Teoretiko-prakticheskie aspekty ischerpaniya prirodnkh resursov i ikh zameshchenie [Theoretical and practical aspects of the exhaustion of natural resources and their replacement]. *Vestnik universiteta [Bulletin of university]*, 4, 125–129.
7. Atkinson, G. & Hamilton, K. (2007). Progress along the Parth: Evolving Issues in Measurement of Genuine Saving. *Environmental and Resource Economics*, 37, 43–61.
8. Hamilton, K. & Hartwick, J. M. (2005). Investing Exhaustible Resource Rents and the Parth of Cosumption. *Canadian Journal of Economics*, 38, 615–621.
9. Polyakov, G. A. et al. (2004). *Modeli i prognoznnyye otsenki perspektiv dobychi nefiti [Models and forecasts of the prospects of oil production]*. Moscow: ROSSPEN Publ., 151.
10. Novoselov, A. L., Medvedeva, O. E. & Novoselova, I. Yu. (2014). *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie v oblasti nedropolzovaniya [Economics, organization and management in the field of subsoil use]*. Moscow: Yurayt Publ., 632.
11. Torvik, R. (2009). Why do Dome Resource-Abundant Countries Succeed while Others do Not? *Oxford Review of Economic Policy*, 25(2), 241–256.
12. Van der Ploeg, F. (2011). Natural Resources: Curse or Blessing? *Journal of Economic Literature*, 49(2), 366–420.
13. Akaev, A. A. & Rudskoy, A. I. (2013). Analiz i prognoz vliyaniya shestogo tekhnologicheskogo uklada na dinamiku mirovogo ekonomicheskogo razvitiya [Analysis and prediction of the effects of the sixth technological structure on the dynamics of world economic development]. *Mirovaya dinamika. Zakonomernosti, tendentsii, perspektivy [World dynamics: regularities, tendencies, prospects]*. Moscow: Librokom Publ., 142–166.
14. Glazyev, S. Yu. & Kharitonov, V. V. (2009). *Nanotekhnologii kak klyuchevoy faktor novogo tekhnologicheskogo uklada v ekonomike [Nanotechnology as a key factor of a new technological paradigm in the economy]*. Moscow: Trovant Publ., 304.
15. Grinin, L. E. & Korotaev, A. V. (2012). *Globalnyy krizis v retrospektive. Kratkaya istoriya podemov i krizisov. Ot Likurga do Alana Grinspena [Global crisis in retrospect. A brief history of rise and fall: from Lycurgus to Alan Greenspan]*. 2d. ed. Moscow: Librokom Publ., 336.
16. Menshikov, S. M. & Klimenko, L. A. (2014). *Dlinnyye volny v ekonomike. Kogda obshchestvo menyaet kozhu [Long waves in the economy: When society changes the skin?]*. 2d ed. Moscow: LENAND Publ., 276.
17. Sadovnichiy, V. A., Akaev, A. A., Korotaev, A. V. & Malkov, S. Yu. (2012). *Modelirovanie i prognozirovanie mirovoy dinamiki [Modelling and forecasting global dynamics]*. Moscow: ISPI RAN Publ., 359.
18. Endres, A. & Kverner, I. (2004). *Ekonomika prirodnkh resursov. Rynki, tekhnologii i innovatsii [Economics of natural resources. Markets, technology and innovation]*. Moscow: Piter Publ., 256.
19. Asheim, G. (2003). Green National Accounting for Welfare and Sustainability: a Taxonomy of Assuptions and Results. *Scottish Journal of Political Economy*, 59, 113–130.
20. Hamilton, K. (1994). Green Adjustments to GDP. *Resources Policy*, 20(3), 155–168.
21. Golub, A. A. & Strukova, E. B. (1999). *Ekonomika prirodnkh resursov [Economics of natural resources]*. Moscow: Aspekt Press Publ., 319.
22. Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137–175.
23. Hamilton, K. & Withaget, C. (2007). Saving Growth and the Path of Utility. *Canadian Journal of Economics*, 40(2), 703–713.
24. *The pan-European Environment: Glimpses into Uncertain Future*. (2007). Copenhagen: European Environment Agency, 75.

25. Arrow, K. J., Dasgupta, P. & Maler, K.-G. (2003). Evaluating Projects and Assessing Sustainable Development in Imperfect Economies. *Environmental and Resource Economics*, 26, 647–685.
26. Bobylev, S. N. (2007). *Indikatory ustoychivogo razvitiya. Regionalnoye izmerenie [Indicators of sustainable development: the regional dimension]*. Moscow: Akropol Publ., 60.
27. Bobylev, S. N., Zubarevich, N. V., Solovyeva, S. V. & Vlasov, Yu. S. (2001). *Ustoychivoye razvitie: metodologiya i metodiki izmereniya [Sustainable development: methodology and methods of measurement]*. Moscow: Ekonomika Publ., 360.
28. Glazyrina, I. P. & Potravnoy I. M. (Eds). (2005). *Ekologicheskie indikatory kachestva rosta regionalnoy ekonomiki [Environmental quality indicators of the regional economy growth]*. Moscow: NIA-Priroda Publ., REFIA Publ., 306.
29. Spangenberg, J. H. (2005). Economic Sustainability of the Economy: Concepts and Indicators. *International Journal of Sustainable Development*, 8, 47–64.
30. Novoselov, A. L. (2012). *Ekonomika prirodopolzovaniya [Environmental economics]*. Moscow: Akademiya Publ., 240.
31. Novoselova, I. Yu. (2015). Modelirovanie vliyaniya vneshnikh faktorov na zameshchenie prirodnkh resursov [Modeling the influence of external factors on the substitution of natural resources]. *Ekonomika prirodopolzovaniya [Environmental economics]*, 2, 25–33.
32. Novoselova, I. Yu. & Lobkovskiy, V. A. (2015). Ekologo-ekonomicheskyy analiz vozmozhnostey ispolzovaniya alternativnykh prirodnkh resursov v regione [Ecological and economic analysis of the use of alternative natural resources in the region]. *Problemy regionalnoy ekologii [Problems of regional ecology]*, 1, 75–80.
33. Novoselov, A. L. (2014). Odin podkhod k analizu vliyaniya faktorov na effektivnost zameshcheniya prirodnkh resursov v energosnabzhenii [One approach to the analysis of the influence of factors on the effectiveness of epy substitution of natural resources in the energy]. *Ekonomika prirodopolzovaniya [Environmental economics]*, 5, 70–76.
34. Kofman, A. & Anri-Laborder, A. (1977). *Metody i modeli issledovaniya operatsiy [Methods and models of the research of operations]*. Moscow: Mir Publ., 432.
35. Finkelshteyn, Yu. Yu. (1976). *Priblizhennyye metody i prikladnyye zadachi diskretnogo programmirovaniya [Approximate methods and applied problems of discrete programming]*. Moscow: Nauka Publ., 265.
36. Novoselov, A. L. & Novoselova, I. Yu. (2010). *Modeli i metody prinyatiya resheniy v prirodopolzovanii [Models and methods of decision making in environmental management]*. Moscow: YuNITI-DANA Publ., 383.
37. Tikhomirov, N. P., Potravnyy, I. M. & Tikhomirova, T. M. (2003). *Metody analiza i upravleniya ekologo-ekonomicheskimi riskami [Methods of analysis and management of ecological and economic risks]*. Moscow: YuNITI-DANA Publ., 350.

Authors

Ivan Mikhaylovich Potravny — Doctor of Economics, Professor, Department of Management of Projects and Programs, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny per., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: ecoaudit@bk.ru).

Andrey Leonidovich Novoselov — Doctor of Economics, Professor, Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny per., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: alnov2004@yandex.ru).

Igor Borisovich Gengut — PhD in Economics, Postdoctoral Candidate, Department of Management of Projects and Programs, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny per., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: igengut@gmail.com).