УДК 332.1:001.895:502/504
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4464
Шифр специальности ВАК: 08.00.05

Влияние региональных инноваций на экологический след территорий Российской Федерации: кейс регионов Сибири и Поволжья

В.В. Спицын[1,3], А.А. Михальчук[1], Н.О. Чистякова[1]✉, В.В. Татарникова[1], Е.А. Акерман[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[3] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

✉worldperson@mail.ru

Аннотация. ***Актуальность:*** обеспечение развития регионов страны на принципах эколого-экономической сбалансированности с учетом национальных целей развития России до 2030 г. В данной работе моделируется взаимосвязь между экономическим развитием и экологическим прогрессом. Исследуется взаимосвязь между инвестициями в инновации и неконтролируемыми выбросами в отдельных регионах России в период с 2010 по 2022 гг. ***Цель:*** изучение влияния интенсивности инноваций на экологический след, а также эффективности функционирования эколого-инновационной деятельности, в регионах разного типа на примере Сибирского Федерального округа и Приволжского Федерального округа. ***Методы:*** панельная регрессия с фиксированными эффектами, корреляционный анализ, метод DEA, кластерный анализ, дисперсионный анализ. ***Результаты и выводы.*** На примере 24 российских регионов показано, что рост интенсивности исследований и разработок региональных компаний не везде приводит к увеличению экологического следа и росту интенсивности выбросов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что экономические и экологические аспекты устойчивого развития противоречат друг другу и указывают на то, что региональные органы власти должны учитывать негативные экологические экстерналии экономического развития при разработке политики, направленной на содействие региональному росту. Отмечается, что рост вложений в исследования и разработки более развитых регионов снижает степень интенсивности выбросов, в то время как крупные промышленные центры Сибири и регионов Поволжья вложениями в инновации способствуют усилению интенсивности выбросов. Подтверждается гипотеза о высокой степени неоднородности экономического пространства по уровню влияния интенсивности исследований и разработок региональных компаний на степень загрязнения окружающей среды в регионах РФ, и подчеркивается необходимость учитывать региональную специфику промышленной структуры экономики. Выявлена высоко значимая неоднородность эффективности функционирования эколого-инновационной деятельности регионов Сибирского Федерального округа и Приволжского Федерального округа. Причем эффективность эколого-инновационной деятельности регионов незначимо коррелирует с выявленным дисбалансом этой деятельности.

Ключевые слова: экологический след, инвестиции и инновации, устойчивое развитие, загрязнение окружающей среды, регрессионный анализ, DEA, регионы РФ

Благодарности: Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда «Глобальная конкурентоспособность и технологическое лидерство регионов: Переосмысление подходов к формированию макрорегионального экономического пространства», соглашение № 22-28-01325.

Для цитирования: Влияние региональных инноваций на экологический след территорий Российской Федерации: кейс регионов Сибири и Поволжья / В.В. Спицын, А.А. Михальчук, Н.О. Чистякова, В.В. Татарникова, Е.А. Акерман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 240–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4464

UDC 332.1:001.895:502/504
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4464

Regional innovations influence on the ecological footprint of the Russian Federation territories: case of the Siberia and Volga regions

V.V. Spitsyn[1,3], A.A. Mikhalchuk[1], N.O. Chistyakova[1]✉, V.V. Tatarnikova[1], E.A. Akerman[2]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[2] National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation
[3] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

✉worldperson@mail.ru

Abstract. ***Relevance.*** Ensuring the development of the country regions on the principles of environmental and economic balance, taking into account the national development goals of Russia until 2030. This article models the relationship between economic development and environmental progress. The relationship between investment in innovation and uncontrolled emissions in certain regions of Russia in the period from 2010 to 2022 is explored. ***Aim.*** To study the intensity of innovation influence on the ecological footprint, as well as the efficiency of functioning of environmental-innovative activities, in regions of different types using the example of the Siberian Federal District and the Volga Federal District. ***Methods.*** Panel regression with fixed effects, correlation analysis, DEA method, cluster analysis, analysis of variance. ***Results and conclusions.*** Using the example of 24 Russian regions, it is shown that the intensity increase of the research and development of regional companies does not always lead to an increase in the environmental footprint and an increase in emissions intensity. The obtained results indicate that the economic and environmental dimensions of sustainable development contradict each other and suggest that regional governments should consider the negative environmental externalities of economic development when designing policies to promote regional growth. It is noted that the growth of investments in the research and development of more developed regions reduce the emissions intensity level. Large industrial centers of Siberia and the Volga regions are investing in innovation to increase the intensity of emissions. The hypothesis about the high degree of the economic space heterogeneity in terms of the influence of the research and development intensity of regional companies on the degree of environmental pollution in the regions of the Russian Federation is confirmed. The necessity is emphasized to take into account the regional specifics of the industrial structure of the economy. A highly significant heterogeneity was revealed in the efficiency of environmental-innovative activities functioning in the regions of the Siberian Federal District and Volga Federal District. Moreover, the effectiveness of environmental-innovative activities of the regions is insignificantly correlated with the identified imbalance of this activity.

Keywords: ecological footprint, investment and innovation, sustainable development, environmental pollution, regression analysis, DEA, Russian Federation regions

Acknowledgements: The study was carried out under the grant from the Russian Science Foundation “Global competitiveness and technological leadership of the regions: rethinking approaches of the macroregional economic space formation”, Agreement no. 22-28-01325.

For citation: Spitsyn V.V., Mikhalchuk A.A., Chistyakova N.O., Tatarnikova V.V., Akerman E.A. The regional innovations influence on the ecological footprint of the Russian Federation territories: case of the Siberia and Volga regions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 240–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4464

Введение

Эволюция теорий пространственного развития сопровождается изучением дополнительных факторов, влияющих на концентрацию экономической деятельности и усилении агломерационных эффектов [1–3] для разного типа регионов. В результате появляются принципиально иные значимые факторы, влияющие на развитие регионов: качество человеческого капитала и среды обитания, развитие диверсифицированного производства, обмен и переток знаний. Кроме того, современные исследования пространственного развития рассматривают процессы ускорения технологических открытий, глобализацию, рост открытости экономик, а также, учитывая очевидность исчерпанности прежней модели общественного развития, основанной на потреблении благ и экономической конкуренции, – необходимость перехода к модели устойчивого развития. Насколько влияние «триады» экономического роста [4] значимо для снижения пространственного неравенства российских регионов и усиления их технологического лидерства, насколько периферийные регионы способны технологически отвечать целям устойчивого развития – вопросы на текущий момент дискуссионные.

Исследование факторов, связанных с ростом экономики – ВВП, ВВП на душу населения, валового регионального продукта (ВРП), ВРП на душу населения, промышленного производства, уровня урбанизации, динамики доходов населения и инвестиций в основной капитал, которые влияют на изменение динамики загрязнений, проводилось по данным различных стран и регионов [1–3]. В монографии [5] доказывается, что снижение уровня загрязнений связывалось с несколькими факторами, из которых обычно выделяли технологический уровень и структурные сдвиги. Фактор изменения структуры экономики обычно учитывался через долю сельского хозяйства в ВВП, долю добычи полезных ископаемых в ВВП, долю промышленности в ВВП и долю сферы услуг. Исследования [6] выявили, что форма зависимости загрязнений от ВРП может быть разной и определяется особенностями страны, прежде всего технологическим прогрессом, активностью структурных сдвигов и воздействием внешних шоков.

Важно отметить, что российский контекст реализации повестки устойчивого развития уникален. С одной стороны, большая территория, массивы лесных и водных ресурсов, низкая плотность населения и бизнеса снижают первостепенность экологических проблем. С другой стороны, исторически обусловленное преобладание «грязной» добывающей промышленности (нефтегазовая промышленность генерирует карбоновый след) и «грязных», экологически опасных отраслей в обрабатывающей промышленности (металлургия, нефтехимия, атомная промышленность и т. д.) усложняет решение экологических задач. Немаловажно, что для России характерны ярко выраженные различия между территориями (регионами и муниципальными образованиями) по социо-эколого-экономическим характеристикам, что затрудняет разработку универсальных подходов к решению вопросов снижения пространственного неравенства.

Несмотря на многолетние исследования, существует недостаток знаний о том, какое влияние одновременное достижение этих целей может оказать на макроэкономический рост [7]. Вместе с тем влияние инноваций на региональное развитие широко признается в литературе [8]. Сама цель поиска новых комбинаций ресурсов, составляющая суть инновационного развития, заключается в выявлении новых способов делать больше при меньших затратах [9]. Хотя природа инноваций плохо определена [10] и никогда нельзя гарантировать успешный результат любого конкретного проекта исследований и разработок (НИОКР), в целом инновационная деятельность выгодна с точки зрения повышения отдачи от ресурсов [11], и компании ожидают увидеть такие улучшения, принимая участие в различных проектах НИОКР. И если вопросы влияния интенсивности НИОКР и усиления инновационной активности компаний на их экономическую активность и рост территорий изучен достаточно подробно, то влияние данных процессов на экологический след исследовано недостаточно.

На текущий момент экономические агенты руководствуются доктриной Фридмана [12], согласно которой их первоочередной обязанностью является предоставление экономических выгод акционерам, а социальные и экологические соображения рассматриваются как просто ограничения. Растущее понимание необходимости устойчивого развития и выдвижение этой повестки дня на первый план Организацией Объединенных Наций [13] заставили многих ученых предположить, что ключ к достижению тройного результата лежит в инновационном развитии, когда субъекты инновационной деятельности целенаправленно решают экологические задачи, одновременно планируя свои экономические цели [14]. Подобная положительная взаимосвязь между предпринимательством и инновациями, которая считается универсальной, на самом деле наблюдается только в развитых странах [15], положительная взаимосвязь между инновациями и устойчивым развитием, вероятно, будет наблюдаться в узком подмножестве при достаточно уникальных обстоятельствах [16, 17]. Можно ожидать увидеть положительное влияние инноваций на социальные или экологические результаты только в том случае, если они явно требуются основными правилами общества, воплощенными в законе и в этических нормах [12]. В отсутствие такой политики и институционального, этического и подобного давления на «основные правила общества» инвестиции в НИОКР, вероятно, приведут к ухудшению экологических условий. В связи с этим при исследовании эколого-экономических процессов в работе [5] предложено оценивать экологический показатель (выбросы в атмосферу загрязняющих веществ) во взаимосвязи с интенсивностью НИОКР, что позволит выявить корреляцию между экономическими и экологическими целями устойчивого развития в разрезе Сибирских регионов и Поволжья и оценить степень пространственной неоднородности взаимосвязи между интенсивностью НИОКР и интенсивностью выбросов по регионам СФО и ПФО. Таким образом, цель исследования – изучение влияния интенсивности инноваций на экологический след в регионах разного типа на примере СФО и ПФО, что позволяет сделать вывод о неоднородности экономического пространства.

Основная гипотеза, решаемая в рамках данного исследования: высокая степень неоднородности экономического пространства по уровню влияния интенсивности НИОКР региональных компаний на

степень загрязнения окружающей среды в регионах РФ.

Поиск новых подходов к региональному развитию обусловливает постановку исследовательских задач.

Материалы и методы

Объектом исследования являются 10 регионов Сибирского федерального округа (СФО) и 14 регионов Приволжского федерального округа (ПФО).

Таблица 1. *Регионы СФО и ПФО*

Table 1. *Regions of the Siberian Federal District (SFD) and the Volga Federal District (VFD)*

Код (аббревиатура) Code (abbreviation)	Регион Region	Федеральный округ Federal District
АК AR	Алтайский край Altai Region	СФО SFD
ИО IR	Иркутская область Irkutsk Region	СФО SFD
КК KK	Красноярский край Krasnoyarsk Region	СФО SFD
КО KR	Кемеровская область Kemerovo Region	СФО SFD
КрО KR	Кировская область Kirov Region	ПФО VFD
НгО NR	Нижегородская область Nizegorodsk Region	ПФО VFD
НО NovR	Новосибирская область Novosibirsk region	СФО SFD
ОО OR	Омская область Omsk Region	СФО SFD
ОрО OrR	Оренбургская область Orenburg Region	ПФО VFD
ПнО PenR	Пензенская область Penza Region	ПФО VFD
ПрК PR	Пермский край Perm Region	ПФО VFD
РА RA	Республика Алтай Republic of Altai	СФО SFD
РБш RB	Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	ПФО VFD
РМр RMor	Республика Мордовия Republic of Mordovia	ПФО VFD
РМЭ RM	Республика Марий Эл Republic of Mari El	ПФО VFD
РТ RT	Республика Тыва Republic of Tyva	СФО SFD
РТт RTat	Республика Татарстан Republic of Tatarstan	ПФО VFD
РХ RKh	Республика Хакасия Republic of Khakassia	СФО SFD
РЧв RCh	Республика Чувашия Republic of Chuvashia	ПФО VFD
СмО SR	Самарская область Samara Region	ПФО VFD
СрО SarR	Саратовская область Saratov region	ПФО VFD
ТО TR	Томская область Tomsk Region	СФО SFD
УдР UdR	Удмуртская республика Udmurtia Region	ПФО VFD
УлО UR	Ульяновская область Ulyanovsk Region	ПФО VFD

В исследовании используется выборка 24 регионов СФО и ПФО за 2010–2022 гг. База содержит данные Росстата [18]. Всего база данных содержит информацию по 24 регионам России и состоит из 312 наблюдений (24 регионов умножить на 13 лет).

С учетом проведенных ранее исследований мы используем:

- интенсивность неконтролируемых выбросов (Emission intensity – *EI*) в качестве зависимой переменной [19]. *EI* рассчитывается как отношение неучтенных выбросов в атмосферу от стационарных источников в регионе к стоимости продаж региональных фирм (тонны выбросов на 1 млрд р. реализованной продукции);
- интенсивность НИОКР (Regional R&D intensity – *RDI*) в регионе в качестве независимой переменной [20]. *RDI* рассчитывается как отношение инвестиций в НИОКР региональных компаний к объему продаж в регионе (в %).

Для оценки влияния интенсивности НИОКР на интенсивность выбросов была использована панельная регрессия [21–25]. Выбор адекватной модели (сквозной, фиксированных эффектов и случайных эффектов) осуществляется на основании тестов Вальда, Бройша–Пагана и Хаусмана. Выражение для панельной регрессионной модели (1) выглядит следующим образом:

$$EI_{it} = \beta RDI_{it} + u_i + \epsilon_{it}\ , \qquad (1)$$

где i – номер объекта наблюдения (региона); t – время наблюдения (год), RDI и EI – стандартизированные независимая и зависимая переменные; β – коэффициент при независимой переменной; u_i – индивидуальные эффекты; ϵ_{it} – остаточные случайные величины. Индивидуальные эффекты равны нулю в случае сквозной модели (Zero Effects – ZE-модели), считаются фиксированными параметрами в панельной регрессионной модели с детерминированными эффектами (для уникального набора объектов) (Fixed-Effects – FE-модели) и предполагаются случайными в панельной регрессионной модели со случайными эффектами (для случайным образом выбранных объектов из большой генеральной совокупности) (Random-Effects – RE-модели).

Аналогичные исследования на уровне стран были проведены в [26] по использованию панельной регрессии с фиксированными и случайными эффектами для оценки влияния экономического развития (в частности, роста ВВП) на выбросы углекислого газа. На уровне российских регионов в [27] исследована панельной сквозная регрессии влияния 17 ключевых социо-эколого-экономических показателей на улавливание загрязняющих атмосферу веществ. Следуя Маркуардту [28], была стандартизирована предикторная переменная (RDIст). Расче-

ты проводились с использованием программы STATA. Заметим, что иногда в подобных случаях ограничиваются использованием корреляционного анализа: в [29] – для исследования взаимосвязи интегрального показателя социально-экономического развития и сводного экологического индекса или в [30] – для выявления взаимосвязи между индексом экономического развития и индексом экологической результативности территории на основе данных нефинансовой отчетности, где сами результирующие индексы предварительно были рассчитаны с помощью множественной регрессии от соответствующих экономических или экологических компонент.

1. Для оценки пространственной неоднородности показателей RDI и EI применен метод иерархической кластеризации (с помощью правила объединения – метода Варда и меры близости – Евклидово расстояние), эффективно применяемый для кластеризации российских регионов по инновационным показателям [31–33]. Оценка качества построенных кластерных моделей регионов проводилась с использованием статистических критериев дисперсионного анализа [34].
2. Оценка эффективности функционирования регионов СФО и ПФО по показателям инновационно-экологической деятельности проведена с помощью метода DEA (Data Envelopment Analysis) [35, 36] или анализа среды функционирования [37]. DEA-метод реализуется посредством многократного решения оптимизационной задачи линейного программирования и имеет два вида моделей: модели, ориентированные на вход (IN), для оценки эффективности минимизации использования ресурсов и модели, ориентированные на выход (OUT), для оценки эффективности максимизации получения результата. Эффективные регионы расположены на линии фронта эффективности (фронтире), а неэффективные – внутри фронта. Чем ближе к фронтиру расположен регион, тем выше значение относительной эффективности его управленческой деятельности. Расчеты выполнены с помощью программных продуктов: DEAP [38] и STATISTICA [34].

Результаты исследования

Регионы СФО и ПФО составляют неоднородную выборку по исходным показателем RDI и EI. Относительно (выборки регионов СФО и ПФО) высокие значения показателя EI имеют следующие регионы: прежде всего Красноярский край (КК), а также Кемеровская область (КО) и республика Тыва (РТ). При этом республики Тыва и Алтай характеризуются относительно высоким значением коэффициента вариации EI. Группа регионов – Нижегородская (НгО) и Ульяновская (УлО) области – имеет относительно высокие значения показателя RDI. Опять же республика Алтай характеризуется относительно высоким значением коэффициента вариации RDI. Пространственная неоднородность исходных показателей RDI и EI проиллюстрирована на рис. 1.

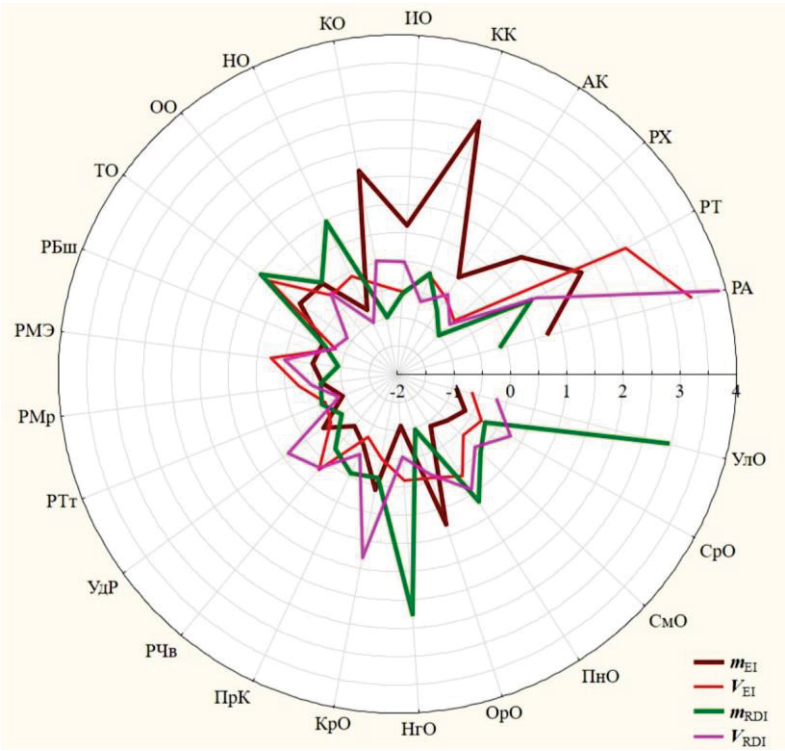

Рис. 1. *Линейные графики стандартизированных числовых характеристик региональных показателей EI и RDI за период 2010–2022 гг.: среднее* ***m*** *и коэффициент вариации* ***V***

Fig. 1. *Line graphs of standardized numerical characteristics of regional indicators EI and RDI for 2010–2022: mean* ***m*** *and coefficient of variation* ***V***

Таблица 2. *Оценки влияния RDI на EI по кластерам регионов СФО+ПФО за 2010–2022 гг.(фрагмент)*

Table 2. *Estimates of RDI impact on EI by clusters of SFD+VFD regions for 2010–2022 (fragment)*

Кластер Cluster	К4		К5		К7	
Регионы Regions	ИО, АК, РМЭ, УдР, РБш		ТО, ОО, НО, ПнО, КрО, ПрК		РМр, РТт	
Эффекты Effects	FE	RE	FE	RE	FE	RE
β	0,324*** (0,090)	0,332*** (0,088)	0,089 (0,111)	0,070 (,108)	–0,273* (0,116)	-0,71*** (0,144)
Критерий качества модели Model quality criterion	F(1;59)=12,85***	χ2(1)=14,08***	F(1; 71)=0,64	χ2(1)=0,42	F(1;23)=5,51*	χ2(1)=24,51***
Тест Вальда Wald test	F(4;59)=85,13***	–	F(5;71)=42,03***	–	F(1;23)=36,46***	–
Тест Бройша–Пагана Breusch–Pagan test	–	χ^2(01)=266,53***	–	χ^2(01)=231,07***	–	χ^2(01)=0,00
Тест Хаусмана Hausman test	χ^2(1)=0,25		χ^2(1)=0,58		χ^2(1)=14,72***	

*Примечание. Зависимая переменная: EI. Стандартные ошибки – в скобках; ***p<0,001; **p<0,01; *p<0,05.*
*Note. Dependent Variable: EI. Standard errors are in parentheses; ***p<0.001; **p<0.01; *p<0.05.*

С учетом уже выделенных контрастных групп регионов (НгО, УлО); (РТ, РА) и (КК) методом иерархической кластеризации построена восьмикластерная высококачественная (по критериям дисперсионного анализа) модель регионов СФО и ПФО по совокупности показателей *EI* и *RDI*. Проведена оценка пространственной неоднородности взаимосвязи между *EI* и *RDI* по выделенным кластерам регионам СФО и ПФО. Результаты кластерной панельной регрессии *RDI* на *EI* представлены в табл. 2.

Согласно табл. 2, в зависимости от регионального кластера влияние *RDI* на *EI* характеризуются высоко значимым положительным β в случае К4, статистически значимым отрицательным β в случае К7 или незначимым β≈0 в случае К5. При этом в случае К4 и К5 высоко значимы как фиксированные эффекты (по тесту Вальда), так и случайные эффекты (по тесту Бройша–Пагана), причем в равной мере (на основании теста Хаусмана). В случае К7 фиксированные эффекты высоко значимы (по тесту Вальда), а случайные эффекты незначимы (по тесту Бройша–Пагана), поэтому адекватной моделью панельных данных в случае К7 является статистически значимая панельная регрессия с фиксированными эффектами *FE*.

По результатам панельной регрессии выявлена кластерная пространственная неоднородность влияния интенсивности НИОКР (*RDI*) на интенсивность выбросов (*EI*):

- **К1** – кластер регионов (РА, РТ) со средними значениями *RDI*, выше среднего значениями *EI* и высоко значимым положительным влиянием *RDI* на *EI* (β≈1,00; *p*≈0,000).
- **К2** – кластер регионов (КО, ОрО, РХ) с относительно низкими значениями *RDI*, выше среднего значениями *EI* и сильно значимым положительным влиянием *RDI* на *EI* (β≈0,41; *p*≈0,005).
- **К3** – кластер регионов (РЧв, СмО, СрО) со средними значениями *RDI*, низкими значениями *EI* и высоко значимым положительным влиянием *RDI* на *EI* (β≈0,65; *p*≈0,000).
- **К4** – кластер регионов (АК, ИО, РБш, РМЭ, УдР) с относительно низкими значениями *RDI*, средними значениями *EI* и высоко значимым положительным влиянием *RDI* на *EI* (β≈0,32; *p*≈0,000).
- **К5** – кластер регионов (КрО, НО, ОО, ПнО, ПрК, ТО) со средними (КрО, ОО, ПрК) и выше среднего (НО, ПнО, ТО) значениями *RDI*, со средними (КрО, ОО, ТО) и ниже среднего (НО, ПнО, ПрК) значениями *EI* и незначимым положительным влиянием *RDI* на *EI* (β≈0,09; *p*≈0,43).
- **К6** – кластер регионов (НгО, УлО) с относительно высокими значениями *RDI*, относительно низкими значениями *EI* и незначимым отрицательным влиянием *RDI* на *EI* (β≈–0,07; *p*≈0,51).
- **К7** – кластер регионов (РМр, РТт) с относительно низкими значениями *RDI* и *EI*, при этом со статистически значимым отрицательным влиянием *RDI* на *EI* (β≈ –0,27; *p*≈0,028).
- **К8** – моно кластер (КК) со средним значением *RDI*, относительно высоким значением *EI* и незначимым отрицательным влиянием *RDI* на *EI* (β≈–0,35; *p*≈0,25 в рамках сквозной регрессии ZE).

Согласно критериям дисперсионного анализа (параметрическому Фишера и ранговому Краскела–Уоллиса) построена высококачественная (на уровне значимости p=0,0000 по *RDI* и *EI*) восьмикластерная модель регионов СФО+ПФО. При этом, например, кластеры К1 и К2, или К4 и К5, а также К3 и К7 незначимо (p>0,10) различаются по *EI* , но высоко значимо по *RDI*; наоборот, кластеры К1 и К5, или К4 и К7 незначимо (p>0,10) различаются по *RDI*, но высоко значимо по *EI*.

Для оценки эффективности функционирования регионов СФО и ПФО по показателям инновационно-экологической деятельности с помощью метода DEA проведено преобразование зависимого показателя *EI* в результирующий EI0, обратно пропорционально связанный с *EI*, то есть при оценке эффективности минимизации ресурсов использован *RDI* (TEin) и оценки эффективности максимизации результата – EI0 (TEout).

Модель DEA (IN / OUT _VRS) для ресурса *RDI* и результата EI0, ориентированная на вход (IN)/выход (OUT) с переменной отдачей от масштаба (VRS), позволила оценить как статическую эффективность TEout регионов по максимизации результата EI0 при фиксированном ресурсе *RDI*, так и эффективность TEin регионов по минимизации ресурса *RDI* при фиксированном результате EI0.

По результатам расчета DEA оценены эффективности (усредненные по регионам и годам) TEout=0,503 (по максимизации результата EI0 при фиксированном ресурсе RDI) и TEin=0,378 (по минимизации ресурса *RDI* при фиксированном результате EIO). В результате расчетов выявлено: 1 постоянный (все 13 лет) регион-лидер (НгО) и 6 непостоянных (РТт – 11 лет, РХ – 10 лет, РМЭ – 7 лет, РА– 5 лет, КО – 3 года, ОрО – 1 год) за 2010–2022 гг.

Графически техническая эффективность TEout определяется как отношение расстояния от оси ресурсов до фактического положения к расстоянию от оси ресурсов до точки имитационного положения региона (ломаная прямая зелёного цвета). Аналогично TEin определяется как отношение расстояния от оси результатов до точки имитационного положения региона фактического положения к расстоянию от оси результатов до фактического положения (рис. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о пространственной неоднородности показателей эффективности TEin и TEout, усредненных за 2010–2022 гг. по регионам СФО и ПФО. Для оценки этой неоднородности применен метод иерархической кластеризации (с помощью правила объединения – метода Варда, и меры близости – Евклидово расстояние). Результаты кластеризации регионов по TEin и TEout представлены на рис. 3.

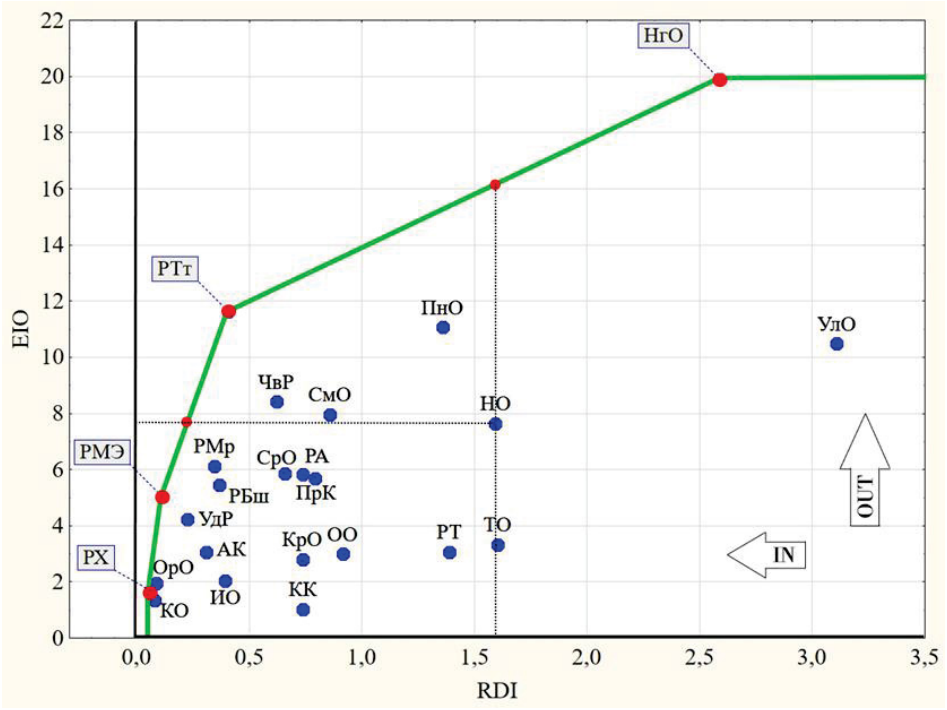

Рис. 2. *Диаграмма рассеяния регионов СФО+ПФО относительно фронтира (ломаная прямая зелёного цвета) в координатах (RDI; EIO), усредненных за 2010–2022гг.*

Fig. 2. *Scatter diagram of the SFD+VFD regions relative to the frontier (broken straight line in green) in coordinates (RDI; EIO), averaged for 2010–2022*

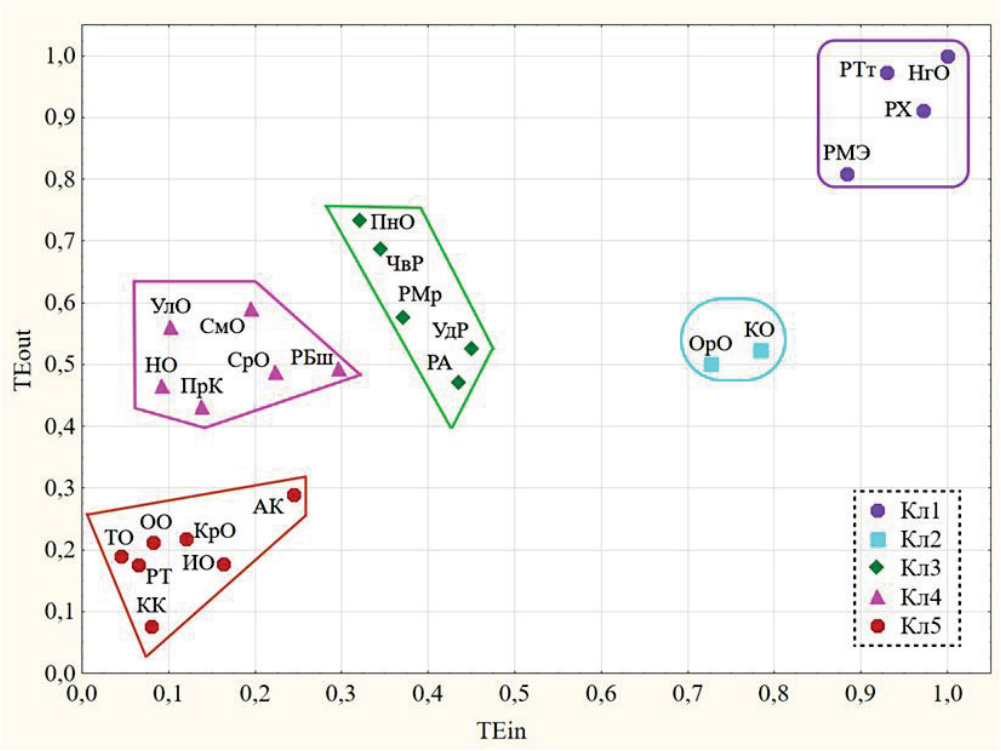

Рис. 3. *Диаграмма рассеяния с кластерами регионов СФО и ПФО по TEin и TEout*
Fig. 3. *Scatter diagram with clusters of the SFD and VFD regions by TEin and TEout*

Характеристика кластеров регионов СФО и ПФО по TEin и TEout (при средних по всем регионам TEin=0,379 и TEout=0,503):

- Кл1 – кластер высокой эффективности (средние по кластеру TEin=0,946 и TEout=0,923) включает 4 региона: НгО, РТт, РХ и РМЭ.
- Кл2 – кластер эффективности выше средней по TEin и средней по TEout (средние по кластеру TEin=0,755 и TEout=0,512) включает 2 региона: КО и ОрО.
- Кл3 – кластер средней эффективности (средние по кластеру TEin=0,385 и TEout=0,598) включает 5 регионов: ПнО, ЧвР, РМр, УдР, РА.
- Кл4 – кластер эффективности средней TEout и низкой TEin (средние по кластеру TEin=0,175 и TEout=0,504) включает 6 регионов: УлО, Но, ПрК, СмО, СрО и РБш.
- Кл5 – кластер низкой эффективности (средние по кластеру TEin=0,114 и TEout=0,191) включает 7 регионов: ИО, КрО, ОО, ТО, РТ, АК и КК.

Согласно критерию Краскела–Уоллиса по параметрам TEin и TEout построена высококачественная (на уровне значимости p=0,0005 по параметру TEin и на уровне значимости p=0,0006 по параметру TEout) пятикластерная модель регионов СФО и ПФО. При этом, например, по параметру TEin кластер Кл2 слабо значимо отличается от Кл1 (p=0,064) и от Кл3 (p=0,053), а кластер Кл3 сильно значимо отличается от Кл4 (p=0,006) и от Кл5 (p=0,004); аналогично по параметру TEout кластеры Кл4 и Кл5 различаются сильно значимо (p=0,003), а кластеры Кл1 и Кл2 – слабо значимо (p=0,064).

Обсуждение и заключение

1. Результаты панельной регрессии с фиксированными эффектами для кластеров регионов ПФО и СФО за 2010–2022 гг. показали преимущественно положительную связь между показателями *RDI* и *EI*. Что подтверждает тезис о том, что экономические и экологические аспекты целей устойчивого развития, выдвинутых ООН, сами по себе находятся в противоречии друг с другом, и без вмешательства государства они вряд ли смогут найти естественное соответствие.
2. Оценка пространственной неоднородности взаимосвязи между *RDI* и *EI* по регионам ПФО и СФО с помощью панельной регрессии и метода иерархической кластеризации выявила три группы регионов: 13 регионов (К1–К4) имеют положительную связь между показателями *RDI* и *EI*; 2 региона (К7) со значимой отрицательной связью между показателями *RDI* и *EI*; 9 регионов (К5, К6, К8) с незначимой положительной и отрицательной связью между показателями *RDI* и *EI*. В этой связи отмечается высокая пространственная неоднородность взаимосвязи между *RDI* и *EI* по регионам ПФО и СФО.

3. Особенностью инновационного развития России является то, что большая часть инноваций относится к промышленной сфере. Так, стоимость инновационных продуктов в области промышленного производства составила 3693 млрд р., в сфере услуг – 789 млрд р. Данные по всем видам деятельности, включая сельское хозяйство, строительство, транспорт, сферу услуг свидетельствуют о том, что промышленность является самой инновационной сферой. Именно в промышленности и для нее патентуется большая часть изобретений» [39].
4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что не все инвестиции в инновации одинаковы:
   4.1. Регионы с доминированием сельского хозяйства в структуре экономики: Республики Алтай (РА, К1) – 18 %, Тыва (РТ, К1) – 21 %, Марий Эл (РМЭ, К4) – 18 % и Алтайский край (АК, К4) – 11 %, показали значимую положительную связь между показателями RDI и EI; Пензенская область (ПнО, К5) –19 % с незначимой положительной связью между показателями RDI и EI. Что подтверждает невысокий уровень вложений НИОКР в сельское хозяйство, которые не сопровождаются снижением неконтролируемых выбросов на территории данных регионов.
   4.2. В отраслевой структуре промышленно развитых регионов ПВО и СФО доминируют добывающая и перерабатывающая промышленность:
   - группа промышленно развитых регионов К7 (РТт, РМр) со значимой отрицательной связью между показателями RDI и EI отличается относительно высокой инновационной активностью. Так, Республика Татарстан (РТт) входит в тройку лидеров по инновационной активности (наряду с г. Москвой и Санкт-Петербургом). Что свидетельствует о том, что в данной группе регионов инвестиции в инновации сопровождаются внедрением «зеленых» технологий, которые появились совсем недавно и опираются на новые отрасли и широкое технологическое развитие. Кроме того, регионы, наиболее развитые экономически и иновационно активны, не обладают достаточной квалификацией для внедрения инноваций.
   - в группе регионов К2–К4 со значимой положительной связью между показателями RDI и EI представлены, в частности, Иркутская (ИО, К4) и Самарская области (СмО, К3), в которых доля добывающей промышленности в структуре экономики 13,2 и 22,3 %, доля обрабатывающей промышленности 15,4 и 17,7 % соответственно. Вместе с тем приоритетом инновационного развития в Иркутской и Самарской областях является авиационная промышленность, а также автомобилестроение в Самарской области. В результате инвестиции в инновации в приоритетные отрасли не сопровождаются сокращением неконтролируемых выбросов в данные регионы. В данную группу также входят регионы К2 (КО, РХ, ОрО) и К3 (ЧвР, СрО) с относительно менее развитым промышленным потенциалом и К4 (РБш) с инновационным развитием наукоёмких отраслей.
   4.3. В группу регионов ПФО и СФО с незначимой положительной (К5) и отрицательной (К6 и К8) корреляцией между показателями RDI и EI входят регионы К5 с высокоразвитым научно-образовательным комплексом (НО, ТО, ОО), регионы К6 с инновационным развитием наукоёмких отраслей (УлО) и с относительно менее развитым промышленным потенциалом (НгО), а также К8 (КК).
5. Оценка эффективности функционирования эколого-инновационной деятельности регионов с помощью DEA-метода выявила группу регионов (НгО, РТт, РХ и РМЭ) с относительно высокой технической эффективностью (средние по кластеру TEin=0,946 и TEout=0,923):
   - регионом-лидером по сбалансированности инноваций и политики устойчивого развития является Республика Татарстан (РТ) со значимой (на уровне p=0,03) отрицательной (R= –0,6) корреляцией между показателями *EI* и *RDI* и со значением TEout=0,973 по максимизации результата EIO при фиксированном ресурсе *RDI*, и по эффективности TEin=0,930 по минимизации ресурса *RDI* при фиксированном результате EI0;
   - у Нижегородской области, несмотря на максимальное значение технической эффективности как по TEout=1, так и по TEin=1, видна незначимая (на уровне p=0,38) отрицательная (R= –0,26) корреляция между показателями *EI* и *RDI*. Что свидетельствует об эффективном вложении имеющихся ресурсов *RDI* в EI0, вместе с тем имеющихся ресурсов недостаточно для сбалансированности инновационной политики и политики устойчивого развития региона.
   - Республика Хакасия (РХ) с незначимой (на уровне p=0,32) положительной (R=0,30) кор-

реляцией и Республика Марий Эл (РМэ) со значимой (на уровне p=0,01) положительной (R=0,69) корреляцией между показателями *EI* и *RD* имеют относительно других регионов-лидеров по технической эффективности (TEout=0,911 и TEout=0,809, TEin=0,972 и TEin=0,884 соответственно) меньше ресурсов для сбалансированной политики между инновациями и устойчивым развитием региона (что подтверждается их расположением в нижней части кривой фронтира эффективности).

Результаты исследования подтвердили, что экономические и экологические аспекты целей устойчивого развития, выдвинутых ООН, сами по себе находятся в противоречии друг с другом, и без вмешательства государства они вряд ли смогут найти естественное соответствие. Регионы Сибири и Поволжья характеризуются высокой степенью пространственной неоднородности по влиянию интенсивности НИОКР на уровень загрязнения территорий, что подтверждает выдвинутую гипотезу. Есть территории с высоко значимой положительной связью между показателями RDI и EI (кластеры К1–К4 из 13 регионов), с статистически значимой отрицательной связью между показателями RDI и EI (кластер К7 из 2 регионов) и остальные 9 регионов (К5, К6, К8) с незначительной отрицательно-положительной связью. И хотя инвестиции в инновации можно рассматривать как необходимый этап в борьбе с загрязнением окружающей среды, сами по себе они не являются достаточным фактором, и изучение подобных факторов может дать важную информацию для раскрытия роли инноваций в концепции устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roca J., Serrano M. Income growth and atmospheric pollution in Spain: An input–output approach // Ecological Economics. – 2007. – Vol. 63. – P. 230–242.
2. Лабузова Е. С. Экология и экономический рост: сибирские регионы в свете концепции экологической кривой Кузнеца // Региональная экономика: теория и практика. – 2009. – № 12. – С. 60–62.
3. Шкиперова Г.Т. Экологическая политика как инструмент согласования интересов экономического развития и экологической безопасности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2016. – № 6. – С. 97–111.
4. Общенаучные и специфические основы территориальных исследований / А.Ю. Даванков, Д.Ю. Двинин, П.Я. Дегтярев, Ю.Г. Мальцев // Управление в современных системах. – 2020. – № 3 (27). – С. 16–22.
5. Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т., Поташева О.В. Исследование взаимосвязи экологических и экономических показателей: моделирование и анализ расчетов. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2019. – 128 с.
6. Fried B., Getzner M. Determinants of CO2 emissions in a small open economy // Ecological Economics. – 2003. – Vol. 45. – P. 133–148.
7. Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges / W. Leal Filho, S.K. Tripathi, J.B.S.O.D. Andrade Guerra, R. Giné-Garriga, V. Orlovic Lovren, J. Willats // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. – 2019. – Vol. 26. – № 2. – P. 179–190. DOI: 10.1080/13504509.2018.1505674
8. Gordon I. R., McCann P. Innovation, agglomeration, and regional development // Journal of economic Geography. – 2005. – Vol. 5. – № 5. – P. 523–543.
9. Radjou N., Prabhu J. Frugal Innovation: how to do more with less. – London: The Economist, 2015. – 272 p.
10. Aghion P., Tirole J. The management of innovation // The Quarterly Journal of Economics. – 1994. – Vol. 109. – № 4. – P. 1185–1209.
11. Schulte U.G. New business models for a radical change in resource efficiency // Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2013. – № 9. – P. 43–47.
12. Friedman M. A Friedman doctrine – the social responsibility of business is to increase its profits // The New York Times. – 1970. – Sept. 13. URL: https://www.nytimes.com/1970/09/13/archives/a-friedman-doctrine-the-social-responsibility-of-business-is-to.html (дата обращения: 07.11.2023).
13. The sustainable development goals report 2016 // The sustainable development goals. URL: https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/ (дата обращения: 07.11.2023).
14. Elkington J. 25 years ago i coined the phrase “Triple Bottom Line.” Here’s why it’s time to rethink it // Harvard Business Review. – 2018. – № 25. – P. 2–5. URL: https://hbr.org/2018/06/25-years-ago-i-coined-the-phrase-triple-bottom-line-heres-why-im-giving-up-on-it (дата обращения: 07.11.2023).
15. Anokhin S., Wincent J. Start-up rates and innovation: a cross-country examination // Journal of International Business Studies. – 2012. – Vol. 43. – № 1. – P. 41–60. DOI: 10.1057/jibs.2011.47
16. Company performance and optimal capital structure: evidence of transition economy (Russia) / V. Spitsin, D. Vukovic, S. Anokhin, L Spitsina // Journal of Economic Studies. – 2021. – Vol. 48. – № 2. – P. 313–332. DOI: 10.1108/JES-09-2019-0444
17. Regional issue, innovation, and the ecological footprint / V. Spitsin, D.B. Vuković, E. Akerman, L. Borilo, N. Chistyakova // Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA. – 2023. – Vol. 73. – № 2. – P. 221–236.
18. Федеральная служба государственной статистики. Регионы России. Социально-экономические показатели. – 1999–2023. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204 (дата обращения: 07.11.2023).
19. Drivers of carbon emission intensity change in China / F. Dong, B. Yu, T. Hadachin, Y. Dai, Y. Wang, S. Zhang, R. Long // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 129. – P. 187–201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.035
20. Chen Y., Lee C.C. Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 263. – Article 121550. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121550

21. Torres-Reyna O. Panel data analysis fixed and random effects using Stata (v. 4.2). Data & Statistical Services. – USA: Priceton University, 2007. – 58 p.
22. Baltagi B.H. Econometric analysis of panel data. 6th ed. Business and economics. – Cham, Switzerland: Springer, 2021. – 424 p.
23. Wooldridge J.M. Introductory econometrics: a modern approach. 6th ed. – Boston: Cengage, 2016. – 771 p.
24. Ратникова Т.А. Введение в эконометрический анализ панельных данных // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2006. – Т. 10. – № 2. – С. 267–316.
25. Баум К.Ф., Айвазян С.А., Пеникас Г.И. Эконометрика. Применение пакета Stata. – М.: Изд-во «Юрайт», 2020. – 370 с.
26. Ali E.B., Amfo B. Comparing the values of economic, ecological and population indicators in High- and Low-Income Economies // Economy of region. – 2021. – № 1. – P. 72–85.
27. Алешникова В. И., Бурцева Т. А. Интегральный измеритель экологического развития регионов // Регион: системы, экономика, управление. – 2023 – № 2 (61). – С. 41–49.
28. Marquardt D.W. Comment: you should standardize the predictor variables in your regression models // Journal of the American Statistical Association. – 1980. – Vol. 75 (369). – P. 87–91.
29. Хавроничев В.И., Тюлю Г.М. Статистический анализ влияния экологических факторов на социально-экономическое развитие территории // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2020. – № 2. – С. 46–57.
30. Модель корреляции между экономическим развитием и экологической результативностью на основе данных нефинансовой отчетности компании / В.Д. Богданов, Н.Н. Илышева, Е.В. Балдеску, У.Ш. Закиров // Экономика региона. – 2016. – Т. 12. – Вып. 1. – С. 93–104.
31. Емельянова О.В., Свеженцева К.И. Кластерный анализ регионов ЦФО по уровню инновационного развития // Russian Economic Bulletin. – 2023. – Т. 6. – № 1. – С. 155–161.
32. Заварухин В.П., Чинаева Э.Ю., Чурилова Т.И. Регионы России: результаты кластеризации на основе экономических и инновационных показателей // Статистика и Экономика. – 2022. – Т. 19. – № 5. – С. 35–47.
33. Шамрай-Курбатова Л.В., Леденева М.В. Кластерный анализ субъектов РФ по уровню инновационной активности // Бизнес. Образование. Право. – 2021. – № 1 (54). – С. 88–97.
34. Халафян А.А., Боровиков В.П., Калайдина Г.В. Теория вероятностей, математическая статистика и анализ данных: основы теории и практика на компьютере. STATISTICA. EXCEL. – М.: URSS, 2022. – 320 с.
35. Data envelopment analysis: theory, methodology and applications / A. Charnes, W.W. Cooper, A.Y. Lewin, L.M. Seiford. – New York: Springer Dordrecht, Kluwer. 1995. – 513 p. DOI: 10.1007/978-94-011-0637-5
36. Seiford L.M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995) // Journal of Productivity Analysis. – 1996. – Vol. 7. – P. 99–138.
37. Ратнер С.В. Динамические задачи оценки эколого-экономической эффективности регионов на основе базовых моделей анализа среды функционирования // Управление большими системами: сборник трудов. – 2017. – Т. 67. – С. 81–106.
38. DEAP Version 2.1 бесплатный программный продукт, доступный для скачивания на сайте университета «The University of Queensland». URL: https://economics.uq.edu.au/cepa/software (дата обращения: 07.11.2023).
39. РБК.Тренды // Эксперты ВШЭ составили рейтинг инновационного развития регионов России. – 2021. URL: https://trends.rbc.ru/trends/innovation/61403f699a794719a68bf3b5 (дата обращения: 07.11.2023).

Информация об авторах

Владислав Владимирович Спицын, кандидат экономических наук, доцент Бизнес-школы, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; доцент кафедры экономики, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; spitsinvv_@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8360-7590

Александр Александрович Михальчук, кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; aamih@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-8100-7076

Наталья Олеговна Чистякова, доктор экономических наук, профессор Бизнес-школы, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. worldperson@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6580-9930

Валерия Владимировна Татарникова, кандидат экономических наук, доцент Бизнес-школы, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; tvv0907@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6409-1410

Екатерина Александровна Акерман, младший научный сотрудник Института экономики и менеджмента, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; https://orcid.org/0000-0002-6654-1024

Поступила в редакцию: 09.11.2023
Поступила после рецензирования: 25.12.2023
Принята к публикации: 14.02.2024

REFERENCES

1. Roca J., Serrano M. Income growth and atmospheric pollution in Spain: An input–output approach. *Ecological Economics*, 2007, vol. 63, pp. 230–242.

2. Labuzova E.S. Ecology and economic growth: Siberian regions in the light of the concept of the ecological Kuznets curve. *Regionalnaya ekonomika: teoriya i* praktika, 2009, no. 12, pp. 60–62. (In Russ.)
3. Shkiperova G.T. Environmental policy as a tool for coordinating the interests of economic development and environmental safety. *Nacionalnye interesy: prioritety i bezopasnost*, 2016, no. 6, pp. 97–111. (In Russ.)
4. Davankov A.Yu., Dvinin D.Yu., Degtyarev P.Ya., Maltsev Yu.G. General scientific and specific foundations of territorial research. *Upravlenie v sovremennykh sistemakh*, 2020, no. 3 (27), pp. 16–22. (In Russ.)
5. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. *Study of the relationship between environmental and economic indicators: modeling and analysis of calculations*. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019. 128 p. (In Russ.)
6. Fried B., Getzner M. Determinants of CO2 emissions in a small open economy. *Ecological Economics*, 2003, vol. 45, pp. 133–148.
7. Leal Filho W., Tripathi S.K., Andrade Guerra J.B.S.O.D., Giné-Garriga R., Orlovic Lovren V., Willats J. Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 179–190. DOI: 10.1080/13504509.2018.1505674
8. Gordon I.R., McCann P. Innovation, agglomeration, and regional development. *Journal of economic Geography*, 2005, vol. 5, no. 5, pp. 523–543.
9. Radjou N., Prabhu J. *Frugal innovation: how to do more with less*. London, The Economist, 2015. 272 p.
10. Aghion P., Tirole J. The management of innovation. *The Quarterly Journal of Economics*, 1994, vol. 109, no. 4, pp. 1185–1209.
11. Schulte U.G. New business models for a radical change in resource efficiency. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2013, no. 9, pp. 43–47.
12. Friedman M. A Friedman doctrine – The social responsibility of business is to increase its profits. *The New York Times*, 1970, Sept. 13. Available at: https://www.nytimes.com/1970/09/13/archives/a-friedman-doctrine-the-social-responsibility-of-business-is-to.html (accessed: 7 November 2023).
13. *The sustainable development goals report 2016*. *The sustainable development goals.* Available at: https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/ (accessed: 7 November 2023).
14. Elkington J. 25 Years ago i coined the phrase "Triple Bottom Line." Here's why it's time to rethink it. *Harvard Business Review*, 2018, no. 25, pp. 2–5. Available at: https://hbr.org/2018/06/25-years-ago-i-coined-the-phrase-triple-bottom-line-heres-why-im-giving-up-on-it (accessed: 7 November 2023).
15. Anokhin S., Wincent J. Start-up rates and innovation: a cross-country examination. *Journal of International Business Studies*, 2012, vol. 43, no. 1, pp. 41–60. DOI: 10.1057/jibs.2011.47
16. Spitsin V., Vukovic D., Anokhin S., Spitsina L. Company performance and optimal capital structure: evidence of transition economy (Russia). *Journal of Economic Studies*, 2021, vol. 48, no. 2, pp. 313–332. DOI: 10.1108/JES-09-2019-0444
17. Spitsin V., Vuković D.B., Akerman E., Borilo L., Chistyakova N. Regional issue, innovation, and the ecological footprint. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA*, 2023, vol. 73, no. 2. pp. 221–236.
18. *Federal State Statistics Service*. *Regions of Russia. Socio-economic indicators.* 1999–2023. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204 (accessed: 7 November 2023).
19. Dong F., Yu B., Hadachin T., Dai Y., Wang Y., Zhang S., Long R. Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 129, pp. 187–201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.035
20. Chen Y., Lee C.C. Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 263, Article 121550. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121550
21. Torres-Reyna O. Panel data analysis fixed and random effects using Stata (v. 4.2). *Data & Statistical Services*. USA, Priceton University, 2007, 58 p.
22. Baltagi B.H. Econometric analysis of panel data. 6th ed. *Business and Economics*. Cham, Switzerland, Springer, 2021. 424 p.
23. Wooldridge J.M. *Introductory econometrics: a modern approach*. 6th ed. Boston, Cengage, 2016. 771 p.
24. Ratnikova T.A. Introduction to econometric analysis of panel data. *Ekonomicheskiy zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki*, 2006, vol. 10, no. 2, pp. 267–316. (In Russ.)
25. Baum K.F., Ayvazyan S.A., Penikas G.I. *Econometrics. Using the Stata package: textbook and workshop for universities*. Moscow, Yurayt Publ. House, 2020. 370 p. (In Russ.)
26. Ali E. B., Amfo B. Comparing the values of economic, ecological and population indicators in High- and Low-Income Economies. *Economy of region*, 2021, no. 1, pp. 72–85.
27. Aleshnikova V.I., Burtseva T.A. Integral meter of environmental development of regions. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie*, 2023, no. 2 (61), pp. 41–49. (In Russ.)
28. Marquardt D.W. Comment: you should standardize the predictor variables in your regression models. *Journal of the American Statistical Association*, 1980, vol. 75 (369). pp. 87–91.
29. Khavronichev V.I., Tyulyu G.M. Statistical analysis of the influence of environmental factors on the socio-economic development of the territory. *Nauchny zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment*, 2020, no. 2, pp. 46–57. (In Russ.)
30. Bogdanov V.D., Ilysheva N.N., Baldescu E.V., Zakirov U.Sh. Correlation model between economic development and environmental performance based on company non-financial reporting data. *Ekonomika regiona*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 93–104. (In Russ.)
31. Emelyanova O.V., Svezhentseva K.I. Cluster analysis of regions of the Central Federal District by level of innovative development. *Russian Economic Bulletin*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 155–161. (In Russ.)
32. Zavarukhin V.P., Chinaeva E.Yu., Churilova T.I. Regions of Russia: results of clustering based on economic and innovation indicators. *Statistika i Ekonomika*, 2022, vol. 19, no. 5, pp. 35–47. (In Russ.)
33. Shamray-Kurbatova L.V., Ledeneva M.V. Cluster analysis of subjects of the Russian Federation according to the level of innovation activity. *Biznes. Obrazovanie. Pravo*, 2021, no. 1 (54), pp. 88–97. (In Russ.)

34. Khalafyan A.A., Borovikov V.P., Kalaidina G.V. *Probability theory, mathematical statistics and data analysis: Fundamentals of theory and practice on a computer. STATISTICS. EXCEL*. Moscow, URSS Publ., 2022. 320 p. (In Russ.)
35. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. *Data envelopment analysis: theory, methodology and applications*. New York, Springer Dordrecht, Kluwer, 1995. 513 p. DOI: 10.1007/978-94-011-0637-5
36. Seiford L.M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995). *Journal of Productivity Analysis*, 1996, vol. 7, pp. 99–138.
37. Ratner S.V. Dynamic problems of assessing the environmental and economic efficiency of regions based on basic models for analyzing the operating environment. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov*, 2017, vol. 67, pp. 81–106. (In Russ.)
38. *DEAP Version 2.1 is a free software product available for download on the university website «The University of Queensland»*. Available at: https://economics.uq.edu.au/cepa/software (accessed: 7 November 2023).
39. *RBC/Trends. HSE experts compiled the rating of innovative development of Russian regions*, 2021. (In Russ.) Available at: https://trends.rbc.ru/trends/innovation/61403f699a794719a68bf3b5 (accessed: 7 November 2023).

Information about the authors

Vladislav V. Spitsyn, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Associate Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; spitsinvv_@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8360-7590
Alexander A. Mikhalchuk, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; aamih@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-8100-7076
Natalia O. Chistyakova, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; worldperson@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6580-9930
Valeria V. Tatarnikova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; tvv0907@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6409-1410
Ekaterina A. Akerman, Junior Researcher, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6654-1024

Received: 09.11.2023
Revised: 25.12.2023
Accepted: 14.02.2024