

**ВЫБРОСЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МИРЕ:
СПЛАЙН-АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ
Ильясов Р.Х.**

Ильясов Руслан Хизраилевич
Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова,
Грозный, Российская Федерация. 364024, г. Грозный, ул. А. Шерипова, 32.
E-mail: ilyasov_95@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7040-798X>

В современном мире всё большую актуальность приобретают проблемы декарбонизации экономического развития. Декарбонизация экономики требует сложной перестройки глобальной энергетической системы. Известно, основным источником выбросов углерода является потребление в промышленном производстве углеводородных энергоресурсов – угля, нефти и газа. Следовательно, колебания углеродных выбросов могут коррелировать с тенденциями экономического роста. Яркий пример – снижение выбросов углерода в 2020 году более чем на 6%, вызванное распространением COVID-19. В работе для поиска системных факторов декарбонизации экономики исследуются тенденции выброса углерода в регионах мира в условиях экономических кризисов. Характерная для динамики выбросов углерода малая волатильность требует её моделирования без ошибок аппроксимации. Это позволит сравнивать и небольшие колебания в динамике выброса углерода в регионах мира. В работе предложено моделировать динамику выбросов углерода интерполированием кубическими сплайнами. Как показал анализ, дифференцируемость построенных сплайн-моделей позволила исследовать более чувствительные к малым колебаниям динамики модели мгновенной скорости роста – первые производные моделей динамики углеродных выбросов.

Ключевые слова: выбросы углекислого газа, моделирование, сплайны, скорость, производная, анализ

**GLOBAL CARBON DIOXIDE EMISSIONS:
SPLINE ANALYSIS OF TRENDS
Ilyasov R.Kh.**

Ilyasov Ruslan Khizrailevich
A.A. Kadyrov Chechen State University,
Grozny, Russian Federation. 32 A. Sheripova str., Grozny, 364024.
E-mail: ilyasov_95@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7040-798X>

In the modern world, the problems of decarbonization of economic development are becoming increasingly relevant. Decarbonization of the economy requires a complex restructuring of the global energy system. It is known that the main source of carbon emissions is the consumption of hydrocarbon energy resources in industrial production – coal, oil and gas. Consequently, fluctuations in carbon emissions may correlate with economic growth trends. A striking example is the reduction of carbon emissions in 2020 by more than 6% caused by the spread of COVID-19. In order to search for systemic factors of decarbonization of the economy, the trends of carbon emissions in the regions of the world in the conditions of economic crises are investigated. The low volatility characteristic of the dynamics of carbon emissions requires its modeling without approximation errors. This will make it possible to compare small fluctuations in the dynamics of carbon emissions in the regions of the world. The paper proposes to model the dynamics of carbon emissions by interpolating cubic splines. As the analysis showed, the differentiability of the constructed spline models made it possible to investigate models of instantaneous growth rate that are more sensitive to small fluctuations in dynamics – the first derivatives of models of carbon emission dynamics.

Keywords: carbon dioxide emissions, modeling, splines, velocity, derivative, analysis

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Многие производственные компании приветствуют сегодня переход к зеленой экономике – стремление к углеродной нейтральности. В то же время анализ политического и экономического поведения компаний говорит о наличии противоречий – провозглашая стремление к развитию экологически чистых производств мало компаний отказывалось от использования ископаемого топлива [1]. Устойчивый рост потребностей населения в мире приводит к большему расходованию энергоресурсов в производстве. Это естественным образом нарушает устойчивость и приводит к деградации экосистем. Между тем почти одновременное во всех регионах мира распространение пандемии COVID-19 привело к нарушению цепочек транспортных поставок. Это заметно сократило потребление топлива и привело к заметной декарбонизации экосистем [2]. Реакция глобальной энергетической системы на кризис 2020 года была беспрецедентной, показав самое большое со вре-

мён второй мировой войны снижение выбросов углерода. Целью исследования является анализ системных реакций динамики углеродных выбросов в условиях замедления экономического развития в регионах мира. Это должно выявить различия в тенденциях декарбонизации экономического роста в регионах мира.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ статистических данных показывает незначительную волатильность в динамике выброса углерода с 2007 по 2020 гг. (табл. 1). Это затрудняет анализ воздействия экономических кризисов на колебания объёмов выброса углерода методами классической эконометрики. Для сохранения в аналитических моделях исследуемой динамики реальных колебаний, следует отказаться от сглаживающих процедур. Решением становится использование методов сплайн-моделирования, сохраняющих динамику процесса в узловых точках с абсолютной точностью [3, 4].

Таблица 1

**Динамика выбросов углекислого газа в регионах мира
Table 1. Dynamics of carbon dioxide emissions in the regions of the world**

Выбросы углекислого газа, млн тонн					Темпы роста		Доля в мире
	2007	2010	2019	2020	2020 /2019	2009-19	2020
Северная Америка	6911.4	6499.9	6067.1	5348.1	-12.1%	-0.4%	16.6%
Южная и Центральная Америка	1131.5	1198.5	1274.5	1157.7	-9.4%	1.3%	3.6%
Европа	5017.8	4677.5	4091.3	3596.8	-12.3%	-1.1%	11.1%
СНГ	2003.5	1980.9	2165.6	2039.5	-6.1%	1.2%	6.3%
Ближний Восток	1542.5	1765.6	2190.2	2110.1	-3.9%	2.7%	6.5%
Африка	1070.2	1171.6	1364.5	1254.0	-8.4%	1.8%	3.9%
Азиатско-Тихоокеанский регион	12653.4	13997.5	17203.3	16812.5	-2.5%	2.6%	52.0%
Всего в мире	30330.4	31291.4	34356.6	32318.6	-6.2%	1.4%	100.0%

Источник: bp Statistical Review of World Energy 2021

Для выделения замедлений или ускорений роста в низковолатильной динамике выброса углерода предлагаем выполнить переход от построенных сплайн-моделей к их первым производным. Исследования показывают, интерполирование кубическим сплайном может хорошо описывать динамические изменения эмпирического показателя. Дифференцированием построенной сплайн-модели получаем точные модели колебаний скорости роста [5, 6]. Сплайн-интерполирование было разработано для моделирования и исследования разбросанных данных.

В отличие от полиномиальной, сплайн-интерполирование позволяет описывать структурно-вариативную динамику с высокой точностью. Сплайн-функции хорошо соединяют в единую непрерывную модель интервалы с различающимися тенденциями развития. Адаптивность и непрерывность сплайнов оказываются эффективными для анализа локальных колебаний в динамике реальных данных [7, 8]. Это позволит выявить и «латентные» реакции в колебаниях скорости роста углеродных выбросов в регионах мира [9].

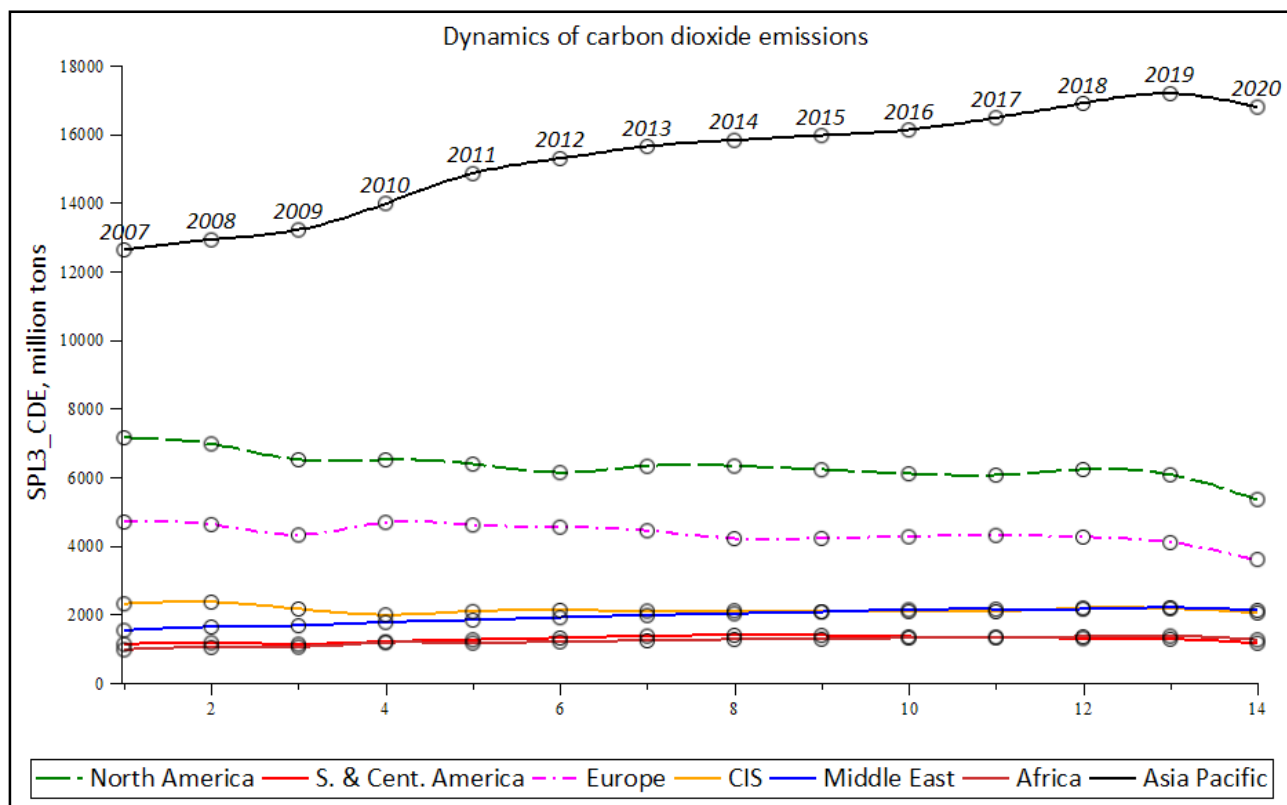


Рис. 1. Динамика выброса углерода в регионах мира
 Fig. 1. Dynamics of carbon emissions in the regions of the world

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика выброса углерода в регионах мира не имеет выраженную тенденцию роста, за исключением Азиатско-Тихоокеанского региона. Среднегодовой темп роста выбросов углерода в мире с 2009 по 2019 гг. не превышал 1.4%. Азиатско-Тихоокеанский регион отличается от других регионов мира более заметной тенденцией роста объёмов выброса углерода – среднегодовой темп роста здесь составил 2.7%. На страны этого региона приходилось в 2020 году более половины всех выбросов углерода в мире, в том числе на долю Китая – более 30% всех выбросов углерода в мире. Как показывают исследования, интенсивность выбросов углерода в этом регионе связана с высокой долей ископаемого топлива в общем потреблении энергии. Экономический рост в Китае производители в большей степени обеспечивают использованием более доступного ископаемого топлива [10]. Страны Северной Америки и Европы за 2009–2019 гг., напротив, показывали в среднем ежегодное снижение объёмов выброса углерода – на 0.4% и 1.1% соответственно.

Для сравнения тенденций объёмов выброса углерода в регионах мира выполним моделирование исследуемой динамики кубическими сплайнами [11, 12]. Сплайн-интерполирование строит

аналитические модели динамики принципиально без погрешностей в узловых точках. Благодаря абсолютной точности сплайн-моделирование становится инструментом изучения динамики со слабой турбулентностью.

Последовательно-изменяемая структура сплайна подстраивается «отрезками» модельной функции к колебаниям экономической динамики, в том числе и к динамике процессов с малой волатильностью.

Преобразование «решётчатой» функции дискретной экономической динамики в гладкую непрерывную экономическую функцию в англоязычной литературе называется «*spline-smoothing*» [13, 14]. Кубические сплайны являются наиболее востребованными для моделирования сложных структурно-вариативных процессов, благодаря своей непрерывности и дифференцируемости [15, 16]. Интерполирование кубическим сплайном есть моделирование динамики «отрезками» полинома третьей степени, последовательно связанными во времени [17]. Например, интерполированием кубическим сплайном динамики выброса углерода в Северной Америке получим модель, состоящую из 13 уравнений полинома третьей степени:

$$\text{SPL3_CDE_NA} = \begin{cases} 7213.086-67.986*t-109.614*(t-1)^3 & t < 2 \\ 7761.154-396.827*t-328.841*(t-2)^2+264.468*(t-2)^3 & t < 3 \\ 7289.616-261.105*t+464.562*(t-3)^2-209.857*(t-3)^3 & t < 4 \\ 6346.106+38.449*t-165.008*(t-4)^2+2.760*(t-4)^3 & t < 5 \\ 7792.545-283.289*t-156.729*(t-5)^2+193.318*(t-5)^3 & t < 6 \\ 6230.156-16.793*t+423.226*(t-6)^2-219.733*(t-6)^3 & t < 7 \\ 5122.882+170.460*t-235.973*(t-7)^2+69.913*(t-7)^3 & t < 8 \\ 7054.470-91.746*t-26.233*(t-8)^2+8.479*(t-8)^3 & t < 9 \\ 7279.972-118.775*t-.796*(t-9)^2+3.070*(t-9)^3 & t < 10 \\ 7206.051-111.155*t+8.415*(t-10)^2+63.440*(t-10)^3 & t < 11 \\ 4999.253+95.995*t+198.735*(t-11)^2-130.530*(t-11)^3 & t < 12 \\ 4996.908+101.874*t-192.856*(t-12)^2-61.318*(t-12)^3 & t < 13 \\ 12148.405-467.793*t-376.811*(t-13)^2+125.604*(t-13)^3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Модель SPL3_CDE_NA, построенная интерполированием кубическим сплайном, отличается от моделей классической эконометрики тем, что описывает динамику выбросов углерода с абсолютной точностью во всех узловых точках. Интерполированием кубическим сплайном построим модели динамики выбросов углерода и в других регионах мира – в странах Южной и Центральной Америки, Европы, странах Содружества независимых государств (СНГ), странах Ближнего Востока, Африки и Азиатско-Тихоокеанский региона. Сплайн-моделирование позволит сохранить и исследовать реальные колебания скорости роста выбросов углерода во всех узловых точках. В моделях, построенных методом наименьших квадра-

тов, информация о реальных колебаниях роста в узловых точках искажается процедурами сглаживания. Сплайн третьей степени непрерывен сам, непрерывными являются и две его производные. Аналитичность сплайна и его производных позволяет перейти от изучения эмпирического процесса к анализу скорости роста.

Сплайн-интерполяционные модели динамики выбросов углерода в регионах мира дифференцированием преобразуем в модели мгновенной скорости роста объёмов выброса (рис. 2). Например, первая производная D1_SPL3_CDE_NA сплайн-модели (1) будет представлять аналитическую модель мгновенной скорости роста выбросов углерода в Северной Америке:

$$\text{D1_SPL3_CDE_NA} = \begin{cases} -67.986-328.841*(t-1.000)^2 & t < 2 \\ 918.535-657.681*t+793.403*(t-2.000)^2 & t < 3 \\ -3048.479+929.124*t-629.570*(t-3.000)^2 & t < 4 \\ 1358.514-330.016*t+8.279*(t-4.000)^2 & t < 5 \\ 1284.005-313.459*t+579.955*(t-5.000)^2 & t < 6 \\ -5095.500+846.451*t-659.199*(t-6.000)^2 & t < 7 \\ 3474.085-471.946*t+209.740*(t-7.000)^2 & t < 8 \\ 327.979-52.466*t+25.437*(t-8.000)^2 & t < 9 \\ -104.454-1.591*t+9.211*(t-9.000)^2 & t < 10 \\ -279.457+16.830*t+190.320*(t-10.000)^2 & t < 11 \\ -4276.180+397.470*t-391.591*(t-11.000)^2 & t < 12 \\ 4730.420-385.712*t-183.955*(t-12.000)^2 & t < 13 \\ 9329.293-753.622*t+376.811*(t-13.000)^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Динамика первых производных оказывается более информативной для сравнения тенденций роста объёмов выброса углерода. По кривым первой производной можно сравнивать мгновенную скорость роста исследуемого показателя в любой момент времени t. В динамике первой про-

изводной более точно обнаруживаются и изменения в скорости роста. Так, наибольшую скорость роста объёмов выбросов углерода на всём исследуемом интервале времени демонстрируют страны Азиатско-Тихоокеанского региона, в первую очередь за счёт роста выбросов углерода в Китае и

Индии. Например, наименьшие значения первой производной в 2008 г., равное - 400 млн тонн, обнаружили страны Северной Америки. Это означает, что в 2008 году мгновенная скорость снижения выбросов углерода в странах Северной Америки превысила 400 млн тонн углерода в год. Подобное снижение углеродных выбросов было достигнуто, в основном, за счёт повышения экологичности производства в США.

Надо отметить, что в США уделяют большое внимание декарбонизации производства, также изучают воздействие утилизации твёрдых бытовых отходов на динамику выбросов углерода [18]. Доминирующую тенденцию к снижению выбросов углерода демонстрируют почти все страны Европы, за исключением Турции.

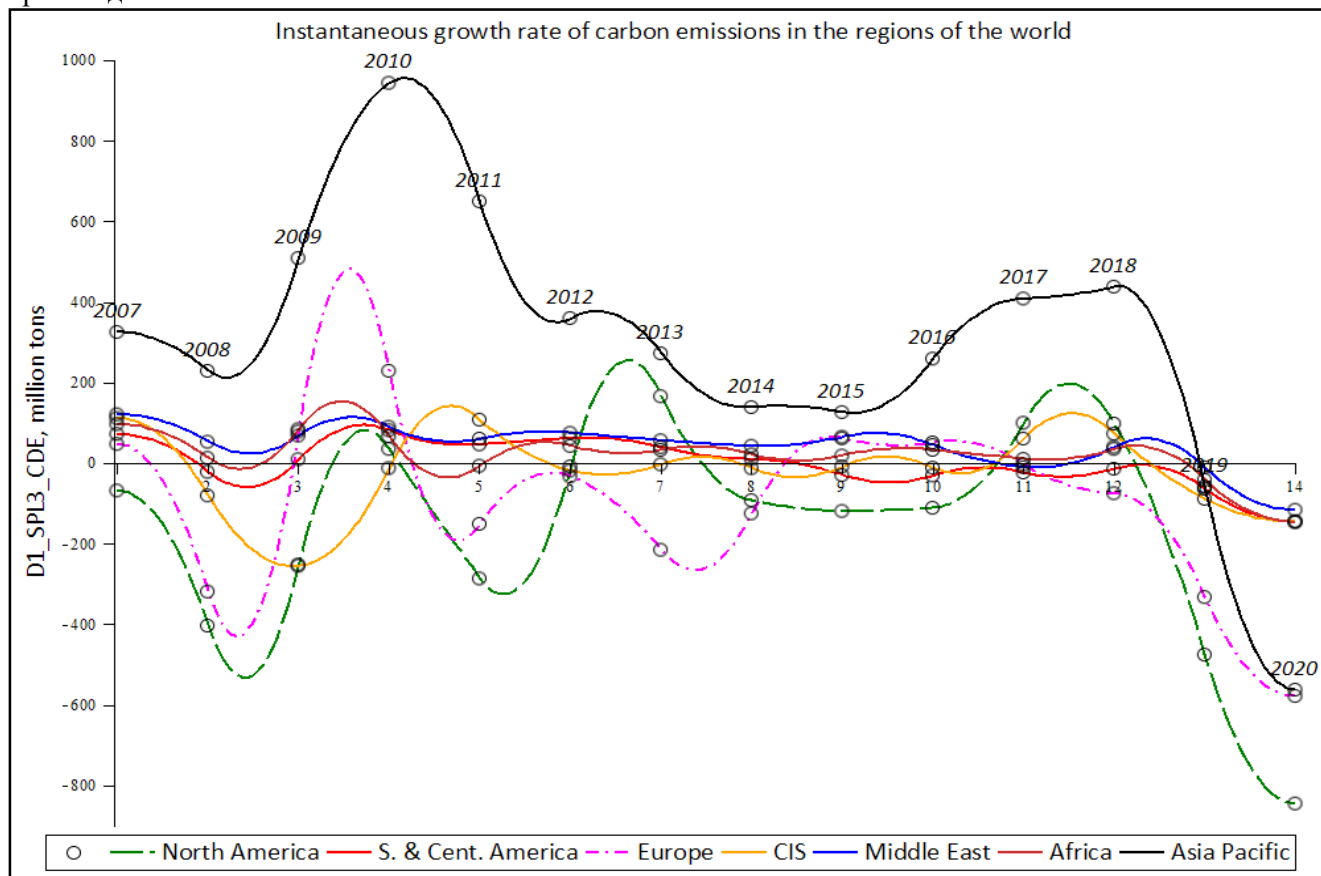


Рис. 2. Мгновенная скорость роста выбросов углерода в регионах мира
 Fig. 2. Instantaneous growth rate of carbon emissions in the regions of the world

Более интересным для поиска факторов декарбонизации, является сравнение скорости роста выбросов в условиях экономических кризисов 2008–2009 гг. и 2020 г.

Экономический кризис 2008 года вызвал, на первый взгляд, одинаковую реакцию динамики выбросов углерода в регионах мира. Кривые первой производной в 2008–2009 гг. почти во всех изучаемых регионах мира синхронные. При этом кривые мгновенной скорости роста объёмов выбросов в регионах мира в 2008 году различаются как знаками первой производной, так и абсолютными значениями. Так, страны Азиатско-Тихоокеанского региона на кризис 2008 года отреагировали лишь небольшим замедлением роста объёмов выброса углерода.

Первая производная для этих стран, несмотря на некоторое снижение абсолютных значений, остаётся в области положительных значений, демонстрируя продолжающийся роста выбросов углерода. В посткризисном 2009 году скорость роста углеродного загрязнения заметно увеличилась, достигнув абсолютного максимума в 2010 году. Несмотря на последовавшие в другие годы колебания, скорость роста объёмов выброса углерода оставалась для Азиатско-Тихоокеанского региона положительной.

Продолжающийся рост углеродного загрязнения в условиях кризиса 2008 года демонстрировали и страны Ближнего Востока, хотя и с небольшим замедлением. Скорость роста объёмов углеродных выбросов оставалась положительной

для стран Ближнего Востока до 2017 года. Практически нулевую скорость роста углеродного загрязнения в 2008 году показали страны Центральной и Южной Америки, а также Африки. Следующие три группы стран – страны Европы, Северной Америки и страны Содружества независимых государств отреагировали на кризис 2008 года заметным снижением выбросов углерода. Если страны Европы и Северной Америки показали почти синхронные траектории скорости снижения выбросов, то страны Содружества независимых государств последовали этой траектории с временным лагом в 1 год. В посткризисном 2010 году кривые скорости роста углеродных выбросов почти всех регионов мира находились в области положительных значений, за исключением стран Содружества независимых государств. Анализ показал заметные различия в изменениях динамики углеродного загрязнения в регионах мира в условиях глобального экономического кризиса в 2008 году. Всемирный экономический кризис, распространившийся в связи с эпидемией COVID-19, оказал сильное воздействие на мировой энергетический рынок. В 2020 году заметно сократилось потребление углеводородных энергоресурсов, что вызвало самое большое с середины прошлого века снижение углеродных выбросов. От кризиса 2008 года ситуация в 2020 году отличается глобальным снижением углеродных выбросов во всех регионах мира. Несмотря на абсолютное доминирование как в доле углеродного загрязнения, так и в скорости роста объёмов углеродных выбросов, углеродные выбросы в странах Азиатско-Тихоокеанского региона и в странах Европы в 2020 году стали снижаться с одинаковой мгновенной скоростью. Наибольшую скорость снижения углеродных выбросов в 2020 году показали страны Северной Америки.

Кризис 2020 года отличался от предыдущих тем, что почти синхронно в странах мира началось сокращение потребления энергии в промышленном производстве и транспортных перевозках.

Это привело к большому сокращению выбросов углекислого газа в мире. Наибольший спад в потреблении углеводородных энергоресурсов пришёлся на долю нефти – снижение на 9.3% в 2020 году по сравнению с предыдущим годом. Падение объёмов потребления природного газа было менее значительным – около 2%. На этом фоне производство возобновляемых источников энергии продолжало расти, а производство солнечной энергии продемонстрировало самый большой рост за всю историю.

Очевидно, что достигнутое снижение углеродных выбросов в 2020 году не было связано с повышением энергоэффективности производства. Обнаруженные взаимосвязи между динамикой выбросов углерода и распространением COVID-19, нельзя считать решением для обеспечения долгосрочной экологической устойчивости [19]. Последующий по мере возобновления экономической активности рост спроса на энергию, вероятно, вновь увеличит объёмы углеродных выбросов. Долгосрочное и устойчивое приближение к углеродной нейтральности возможно ускоренным ростом доли возобновляемых источников энергии при синхронном снижении доли углеводородных энергоресурсов в топливном балансе. Как показывают исследования, сбалансировать экономическое развитие и улучшение экологии позволят зелёные инновации [20].

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jessica Green, Jennifer Hadden, Thomas Hale & Paasha Mahdavi.** Transition, hedge, or resist? Understanding political and economic behavior toward decarbonization in the oil and gas industry. *Review of International Political Economy*. 2021. <https://doi.org/10.1080/09692290.2021.1946708>
2. **Adelodun B., Kareem K.Y., Kumar P., (...), Krishnan S., Khan N.A.** Understanding the impacts of the COVID-19 pandemic on sustainable agri-food system and agroecosystem decarbonization nexus: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. P. 318,128451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128451>.
3. **Banker, R.D., Byzalov, D., Fang, S., Jin, B.** Operating asymmetries and non-linear spline correction in discretionary accrual models. *Review of Quantitative Finance and Accounting*. 2020. N 54(3), P. 803-850. <https://doi.org/10.1007/s11156-019-00808-5>
4. **Cui, Z., Kirkby, J.L., Nguyen, D.** Nonparametric Density Estimation by B-Spline Duality. *Econometric Theory*. 2020. N 36(2), P. 250-291. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266466619000112>

REFERENECES

1. **Jessica Green, Jennifer Hadden, Thomas Hale & Paasha Mahdavi.** Transition, hedge, or resist? Understanding political and economic behavior toward decarbonization in the oil and gas industry. *Review of International Political Economy*. 2021. <https://doi.org/10.1080/09692290.2021.1946708>
2. **Adelodun, B., Kareem, K.Y., Kumar, P., (...), Krishnan, S., Khan, N.A.** Understanding the impacts of the COVID-19 pandemic on sustainable agri-food system and agroecosystem decarbonization nexus: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. P. 318,128451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128451>
3. **Banker, R.D., Byzalov, D., Fang, S., Jin, B.** Operating asymmetries and non-linear spline correction in discretionary accrual models. *Review of Quantitative Finance and Accounting*. 2020. N 54(3), P. 803-850. <https://doi.org/10.1007/s11156-019-00808-5>

5. **Weimei Qi, Bin Shen, Linhong Wang.** "Model of Driver's Eye Movement and ECG Index under Tunnel Environment Based on Spatiotemporal Data". *Journal of Advanced Transportation*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5215479>
6. **Huang, S.-F., Guo, M., Chen, M.-R.** Stock market trend prediction using a functional time series approach. *Quantitative Finance*. 2020. N 20(1), P. 69-79
7. **Gülüm, M., Yesilyurt, M.K., Bilgin, A.** The performance assessment of cubic spline interpolation and response surface methodology in the mathematical modeling to optimize biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115778>
8. **Keller, W., Borkowski, A.** Thin plate spline interpolation. *Journal of Geodesy*. 2019. N 93(9), P. 1251-1269. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01240-2>
9. **Ильясов, Р.Х.** «Латентные» корреляции потоков в экономике: сплайн-анализ. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2021. № 1(127). с. 35-41.
10. **Yu J., Shi X., Guo D., Yang L.** Economic policy uncertainty (EPU) and firm carbon emissions: Evidence using a China provincial EPU index. *Energy Economics*. 2021. N 94(105071). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105071>
11. **Edwards, J.R., Parry, M.E.** On the Use of Spline Regression in the Study of Congruence in Organizational Research. *Organizational Research Methods*. 2018. N 21(1). P. 68-110. <https://doi.org/10.1177/1094428117715067>
12. **Gao, G., Meng, S.** Stochastic claims reserving via a Bayesian spline model with random loss ratio effects. *ASTIN Bulletin*. 2018. N 48(1), P. 55-88. DOI: <https://doi.org/10.1017/asb.2017.19>
13. **Hill, R.J., Scholz, M.** Can Geospatial Data Improve House Price Indexes? A Hedonic Imputation Approach with Splines. *Review of Income and Wealth*. 2018. N 64(4), P. 737-756. <https://doi.org/10.1111/roiw.12303>
14. **Kılıç Depren, S., Kartal, M.T.** Prediction on the volume of non-performing loans in Turkey using multivariate adaptive regression splines approach. *International Journal of Finance and Economics*. 2021. N 26(4). P. 6395-6405. <https://doi.org/10.1002/ijfe.2126>
15. **Lars Kirkby, J., Deng, S.-J.** Swing option pricing by dynamic programming with b-spline density projection. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. 2019. N 22(8). <https://doi.org/10.1142/S0219024919500389>
16. **Rich, J.** A spline function class suitable for demand models. *Econometrics and Statistics*. 2020. N 14. P. 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecosta.2018.02.002>
17. **Richards, S.J.** A Hermite-spline model of post-retirement mortality. *Scandinavian Actuarial Journal*. 2020. N 2020(2). P. 110-127. <https://doi.org/10.1080/03461238.2019.1642239>
18. **Razzaq, A., Sharif, A., Najmi, A., Tseng, M.-L., Lim, M.K.** Dynamic and causality interrelationships from municipal solid waste recycling to economic growth, carbon emissions and energy efficiency using a novel bootstrapping autoregressive distributed lag. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. N 166(105372)
19. **Sarfraz, M., Mohsin, M., Naseem, S. et al.** Modeling the relationship between carbon emissions and environmental sustainability during COVID-19: new evidence from asymmetric ARDL cointegration approach. *Environ Dev Sustain*. 2021. N 23. P. 16208–16226. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01324-0>
20. **Xu, L., Fan, M., Yang, L., Shao, S.** Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China's city level. *Energy Economics*. 2021. N 99(105269). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105269>
4. **Cui, Z., Kirkby, J.L., Nguyen, D.** Nonparametric Density Estimation by B-Spline Duality. *Econometric Theory*. 2020. N 36(2), P. 250-291. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266466619000112>
5. **Weimei Qi, Bin Shen, Linhong Wang.** "Model of Driver's Eye Movement and ECG Index under Tunnel Environment Based on Spatiotemporal Data". *Journal of Advanced Transportation*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5215479>
6. **Huang, S.-F., Guo, M., Chen, M.-R.** Stock market trend prediction using a functional time series approach. *Quantitative Finance*. 2020. N 20(1), P. 69-79
7. **Gülüm, M., Yesilyurt, M.K., Bilgin, A.** The performance assessment of cubic spline interpolation and response surface methodology in the mathematical modeling to optimize biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115778>
8. **Keller, W., Borkowski, A.** Thin plate spline interpolation. *Journal of Geodesy*. 2019. N 93(9), P. 1251-1269. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01240-2>
9. **Ilyasov, R.H.** "Latent" correlations of flows in economics: spline analysis. *Proceedings of the St. Petersburg State University of Economics*. 2021. N 1(127). P. 35-41. (in Russian).
10. **Yu J., Shi X., Guo D., Yang L.** Economic policy uncertainty (EPU) and firm carbon emissions: Evidence using a China provincial EPU index. *Energy Economics*. 2021. N 94(105071). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105071>
11. **Edwards, J.R., Parry, M.E.** On the Use of Spline Regression in the Study of Congruence in Organizational Research. *Organizational Research Methods*. 2018. N 21(1). P. 68-110. <https://doi.org/10.1177/1094428117715067>
12. **Gao, G., Meng, S.** Stochastic claims reserving via a Bayesian spline model with random loss ratio effects. *ASTIN Bulletin*. 2018. N 48(1), P. 55-88. DOI: <https://doi.org/10.1017/asb.2017.19>
13. **Hill, R.J., Scholz, M.** Can Geospatial Data Improve House Price Indexes? A Hedonic Imputation Approach with Splines. *Review of Income and Wealth*. 2018. N 64(4), P. 737-756. <https://doi.org/10.1111/roiw.12303>
14. **Kılıç Depren, S., Kartal, M.T.** Prediction on the volume of non-performing loans in Turkey using multivariate adaptive regression splines approach. *International Journal of Finance and Economics*. 2021. N 26(4). P. 6395-6405. <https://doi.org/10.1002/ijfe.2126>
15. **Lars Kirkby, J., Deng, S.-J.** Swing option pricing by dynamic programming with b-spline density projection. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. 2019. N 22(8). <https://doi.org/10.1142/S0219024919500389>
16. **Rich, J.** A spline function class suitable for demand models. *Econometrics and Statistics*. 2020. N 14. P. 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecosta.2018.02.002>
17. **Richards, S.J.** A Hermite-spline model of post-retirement mortality. *Scandinavian Actuarial Journal*. 2020. N 2020(2). P. 110-127. <https://doi.org/10.1080/03461238.2019.1642239>
18. **Razzaq, A., Sharif, A., Najmi, A., Tseng, M.-L., Lim, M.K.** Dynamic and causality interrelationships from municipal solid waste recycling to economic growth, carbon emissions and energy efficiency using a novel bootstrapping autoregressive distributed lag. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. N 166(105372).
19. **Sarfraz, M., Mohsin, M., Naseem, S. et al.** Modeling the relationship between carbon emissions and environmental sustainability during COVID-19: a new evidence from asymmetric ARDL cointegration approach. *Environ Dev Sustain*. 2021. N 23. P. 16208–16226. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01324-0>
20. **Xu, L., Fan, M., Yang, L., Shao, S.** Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China's city level. *Energy Economics*. 2021. N 99(105269). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105269>