

УДК 339.976.2  
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246  
Шифр специальности ВАК: 5.2.3, 5.2.5

## Оценка влияния различных факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира

И.В. Проворная<sup>1✉</sup>, И.В. Филимонова<sup>1</sup>, А.Д. Крутилина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

✉ provornayaiv@gmail.com

**Аннотация. Актуальность.** При своевременном перестроении экономики в углеродно-нейтральную сторону негативное антропогенное воздействие можно будет ослабить. Целесообразно будет провести комплексный анализ воздействия различных факторов на климатическую политику страны. Более того, исследование опыта развитых государств даст возможность применить их достижения в области климатической политики в России, усовершенствовав и модернизировав политику исходя из национальной особенности экономики. **Цель** исследования заключается в оценке степени влияния эколого-климатических и макроэкономических факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира. **Объектом** исследования являются параметры климатической политики стран мира в области регулирования выбросов углекислого газа, предметом исследования – взаимосвязи эколого-климатических и макроэкономических факторов с углеродоемкостью экономик стран мира. **Методы:** эконометрический метод анализа панельных данных. **Научная новизна.** Подтверждена гипотеза отрицательного влияния одного из основных инструментов климатической политики стран мира (цены на углерод) на углеродоемкость экономики. **Результаты.** Обоснован набор факторов, которые влияют на углеродоемкость стран мира, дополненный таким показателем, как цена на углерод, который является одним из главных показателей развития климатической политики в стране. Все факторы были разделены на две группы (макроэкономические и эколого-климатические), и сформирована база данных для 23 стран. С использованием метода панельных данных построено уравнение зависимости углеродоемкости экономик стран от макроэкономических и эколого-климатических факторов и проверена гипотеза отрицательного влияния цены на углерод на углеродоемкость ВВП стран мира. Оценка различных спецификаций моделей позволила подтвердить данную гипотезу, что свидетельствует о важности развития климатической политики внутри каждой страны и целесообразности введения новых инструментов по регулированию эмиссии углекислого газа. Также было определено, что ВВП, как общий показатель развития всей экономики, имеет наибольшее влияние на сокращение углеродоемкости. При этом для сокращения отношения выбросов углекислого газа к валовому внутреннему продукту необходимо проводить политику замещения ископаемых на низкоуглеродные источники энергии, но только с учётом сырьевых возможностей страны и отраслевой специфики экономики.

**Ключевые слова:** углеродоемкость экономики, факторы, выбросы углекислого газа, панельные данные, страны мира

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-28-02056.

**Для цитирования:** Проворная И.В., Филимонова И.В., Крутилина А.Д. Оценка влияния различных факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 107–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

---

UDC 339.976.2  
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

## Assessment of the impact of different factors on changes in carbon intensity of the world economies

I.V. Provornaya<sup>1✉</sup>, I.V. Filimonova<sup>1</sup>, A.D. Krutilina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ provornayaiv@gmail.com

**Abstract. Relevance.** With the restructuring of the economy in the carbon-neutral side, the negative anthropogenic impact can be weakened. It is very likely that there will be a comprehensive analysis of the impact of various climatic accidents in the country and its action to eliminate the risk of carbon dioxide. Moreover, studies in the experience of the peoples of the states make it possible to use their achievements in the field of climate policy in Russia, improve and modernize their advantages from the characteristics of the national economy. **Aim.** To assess the degree of impact of environmental, climatic and macroeconomic factors on the change in the carbon intensity of the economies of the world. **Objects.** The parameters of the climate policy of the countries of the world in the field of regulation of carbon dioxide emissions. The subject of the study is the relationship of environmental, climatic and macroeconomic factors with the carbon intensity of the economies of the world. **Methods.** Econometric method of panel data analysis. **Scientific novelty.** The paper confirms the hypothesis of the negative impact of one of the main climate policy instruments of the countries of the world (carbon prices) on the carbon intensity of the economy using the construction of the original panel data model. **Results.** The authors have substantiated a set of factors that affect the carbon intensity of the countries of the world, supplemented by such an indicator as the carbon price, which is one of the main indicators of climate policy development in the country. All factors were divided into two groups (macroeconomic and ecological-climatic) and a database was formed for 24 countries. Using the panel data method, the authors constructed the equation of the dependence of the carbon intensity of the economies of countries on macroeconomic and ecological and climatic factors. The authors tested the hypothesis of the carbon price negative impact on the carbon intensity of the economies of countries. Evaluation of various model specifications allowed us to confirm this hypothesis, which indicates the importance of the climate policy development within each country and the feasibility of introducing new tools to regulate carbon dioxide emissions. It was also determined that GDP, as a general indicator of the development of the entire economy, has the greatest impact on reducing carbon intensity. At the same time, in order to reduce the ratio of carbon dioxide emissions to gross domestic product, it is necessary to pursue a policy of replacing fossil fuels with low-carbon energy sources, but only taking into account the country raw material capabilities and the industry specifics of the economy.

**Keywords:** carbon intensity of the economy, factors, carbon dioxide emissions, panel data, countries of the world

**Acknowledgements:** The research was financially supported by the RSF grant no. 22-28-02056.

**For citation:** Provornaya I.V., Filimonova I.V., Krutilina A.D. Assessment of the impact of different factors on changes in carbon intensity of the world economies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 107–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

### Введение

Одной из первых крупных работ по анализу влияния политики государства на выбросы парниковых газов в атмосферу стала статья [1], где были рассмотрены два основных вопроса: должны ли выбросы в экономике подвергаться квотам, тем самым ограничивая количество загрязняющих производств, и должно ли государство вводить экологический налог, фискально ограничивая негативное воздействие человека на природу.

Предположение о том, что влияние государственного регулирования на цену на углерод слишком неопределенно, подтвердилось на практике в

2008 г., когда цены в европейской системе торговли квотами на выбросы (EU Emissions Trading System, EU ETS) обрушились после мирового кризиса на финансовом рынке. Вейцман предложил теорию, согласно которой при такой неопределенности необходимо сравнивать кривые предельных выгод и издержек, тем самым рассматривая не размер наступающей проблемы, а скорость ее изменения.

О неопределенности говорит и Уильям Пайзер в [2], где приводится сравнение влияния двух «прямых» инструментов воздействия на цену на углерод. В статье отмечена неопределенность в из-

держках применения данных инструментов при анализе их эффективности, при этом отмечается, что в условиях текущего уровня загрязнения воздуха и повышения среднегодовой температуры, как ценовое, так и количественное ограничение выбросов дают большой прирост благосостояния человечества по сравнению с отсутствием какой-либо климатической политики.

В работе [3] авторы отмечают, что многие преимущества углеродного налога, или ETS (Emissions Trading System), проистекают из экзогенности цен на разрешенные выбросы. Во-первых, углеродные налоги и ETS предотвращают волатильность цены аукционов на выбросы парниковых газов. Во-вторых, они предполагают меньшие ожидаемые ошибки при планировании такой политики в условиях неопределенности предельных издержек и выгод. А также они позволяют избежать потенциальной передачи богатств странам-экспортерам нефти.

«Продолжающиеся дебаты насчет эффективности той или иной политики еще будут идти, но у всех есть преимущество в виде гибких и постоянных стимулов для сокращения выбросов, которые отсутствуют в других формах регулирования» [4].

Из российских исследований по эффективности политик по борьбе с выбросами парниковых газов стоит упомянуть работу И.А. Башмакова, в которой был проанализирован опыт стран, использующих углеродный налог как экономический инструмент по сокращению выбросов парниковых газов [5]. Автор отмечает, что при оценке эффективности механизма с ценой на углерод необходимо развивать системы отчетности, мониторинга и верификации проектов по сокращению выбросов. Такая система присутствует, например, в США, где все крупные компании обязаны ежегодно отчитываться о выбросах парниковых газов. Чтобы оценить эффективность налога на углерод необходимо обеспечить формирование статистической базы.

Помимо цены на углерод на динамику выбросов углекислого газа влияют и другие факторы: макроэкономические, отраслевые, экологические. В этой связи исследований, оценивающих влияние эффекта от внедрения цены на углерод на энерго- или углеродоёмкость, не так много. В представленной работе будет проведена оценка влияния различных эколого-климатических и макроэкономических факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира.

## Материалы и методы

В качестве методики исследования авторами предложен инструмент анализа панельных данных. Панельные данные можно оценивать с помощью трех разных моделей: линейная модель, модель с фикси-

рованными индивидуальными эффектами, модель со случайными индивидуальными эффектами.

Базовая модель (модель сквозной регрессии) зависимости углеродоемкости страны от регрессоров может быть описана следующим образом:

$$CI_{it} = \alpha + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \varepsilon_{it},$$

где  $\alpha$  и  $\beta_n$  – коэффициенты модели;  $i$  – индекс страны;  $t$  – показатель года;  $\varepsilon_{it}$  – ошибка.

Модель с фиксированными индивидуальными эффектами выглядит следующим образом:

$$CI_{it} = i\mu_i + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \vartheta_{it},$$

где  $i$  – индекс объекта;  $t$  – индекс момента времени;  $\beta$  – вектор коэффициентов регрессии;  $\mu_i$  – региональные эффекты (фиксированные неизвестные параметры);  $\vartheta_{it}$  – ошибка с нормальным распределением с параметрами  $(0, \sigma_\vartheta^2)$ .

Модель со случайными эффектами имеет форму:

$$CI_{it} = \alpha + \delta_i + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \lambda_{it},$$

где  $i$  – индекс объекта;  $t$  – индекс момента времени;  $\beta$  – вектор коэффициентов регрессии;  $\delta_i$  – региональные эффекты, имеющие нормальное распределение с параметрами  $(0, \sigma_\delta^2)$ ;  $\alpha$  – константа;  $\lambda_{it}$  – ошибка с нормальным распределением с параметрами  $(0, \sigma_\lambda^2)$ .

Для выбора между моделью сквозной регрессии и моделью с фиксированными эффектами (Fixed Effect, FE) необходим стандартный F-тест, так как МНК модель – это частный случай FE модели, где эффекты равны 0. То есть проверяется гипотеза о том, что  $f_1=f_2=f_3=\dots=f_n=0$ .

Для сравнения модели с фиксированными эффектами и модели со случайными эффектами (Random Effect, RE) применяется тест Броша–Пэгана, где гипотеза состоит в том, что дисперсия случайных эффектов равна нулю ( $\sigma_\delta^2 = 0$ ).

Статистика Хаусмана, в которой проверяется отсутствие корреляции между индивидуальными эффектами и регрессорами, используется для выбора между моделями RE и FE. Проверяется нулевая гипотеза о том, что мы должны выбрать модель со случайными эффектами, и альтернативная гипотеза о том, что стоит использовать модель с фиксированными эффектами.

Сформирована сбалансированная панель данных на основе статистических показателей из источников: WorldBank, OECD и официальных сайтов федеральных служб государственной статистики стран. В качестве объекта исследования рас-

смотрены следующие страны: Великобритания, Дания, Ирландия, Исландия, Испания, Канада, Китай, Колумбия, Корея, Латвия, Мексика, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Португалия, Словения, США, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция, Эстония, Япония.

Для удобства всем переменным были присвоены следующие условные обозначения:

- углеродоемкость – *CI (Carbon Intensity)*;
- цена на углерод – *CP (Carbon Price)*;
- инфляция – *Inf (Inflation)*;
- доля ВИЭ в потреблении – *REC (Renewable Energy Consumption)*;
- ВВП по ППС – *GDP (Gross Domestic Product)*;
- численность населения – *Pop (Population)*;
- потребление бензина на транспорте – *PC (Petrol Consumption)*;
- доля нефтегазовых доходов в бюджете страны – *OS (Oil Share)*;
- площадь лесов – *FA (Forest Area)*;
- количество крупного рогатого скота – *BA (Beef Amount)*;
- энергоёмкость – *EI (Energy Intensity)*;
- производство цемента – *Cem (Cement Production)*.

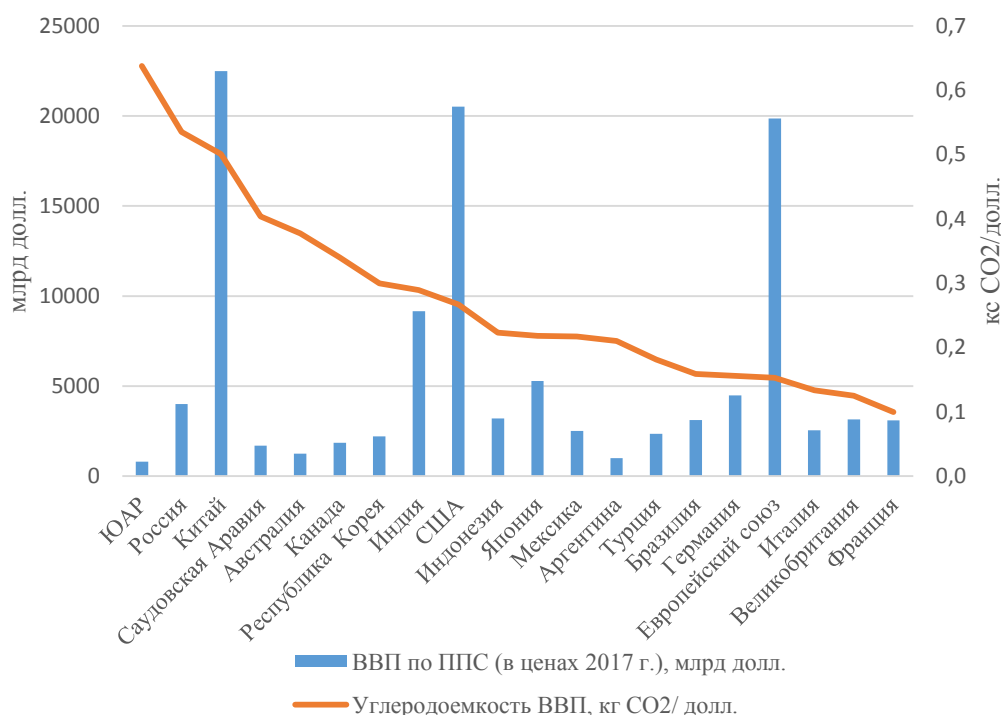
### Результаты исследования

Для анализа в данной работе были отобраны 23 страны, которые входят в состав ОЭСР и имели данные по налоговым поступлениям по конкрет-

ным видам налогов. Период наблюдения – с 1995 г. (как ближайший год с наибольшим количеством стран с доступными данными) по 2019 г. (2020 г. исключается из анализа ввиду пандемии и связанного с ней падения выбросов и сокращения торговых квотами на выбросы). Полученная модель включает 575 наблюдений по 12 переменным.

Зависимой переменной была выбрана углеродоемкость экономики страны. Углеродоемкость – это объем выбросов диоксида углерода ( $CO_2$ ) на единицу валового внутреннего продукта, рассчитанного по паритету покупательской способности. Эта переменная была взята как регрессирующая, так как наиболее точно определяет взаимосвязь развития экономики и выбросов в атмосферу. Углеродоемкость экономики важна для государственного планирования, так как ее высокие значения свидетельствуют об уязвимости страны перед климатическими вызовами, и оказывает сильное влияние на конкурентоспособность продукции и экономическую безопасность (МГЭИК, 2018). На примере стран G-20 наибольший за 2019 г. уровень углеродоемкости ВВП наблюдается у ЮАР, России и Китая, но при этом у стран разный уровень экономического развития (рис. 1).

При отборе факторов был проведен детальный анализ литературы, в которой авторы рассматривали влияние выбранных показателей на углеродоемкость экономики страны или выбросы парниковых газов (табл. 1).



**Рисунок.** Зависимость углеродоемкости ВВП и ВВП по ППС (паритет покупательной способности) (в ценах 2017 г.)  
**Figure.** Relationship between carbon intensity of GDP and GDP at PPP (purchasing power parity) (in 2017 prices)

**Таблица 1.** Отбор факторов для построения модели панельных данных

**Table 1.** Selection of factors for building a panel data model

Фактор Factor	Источник Source
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	[6–9]
Среднегодовая инфляция/Average annual inflation	[10, 11]
Энергоемкость/Energy intensity	[12, 13]
Численность населения/Population	[14, 15]
Цена на углерод/Carbon price	[16, 17]
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	[18, 19]
Доля нефтегазовых доходов в бюджете страны Share of oil and gas revenues in the country budget	[20]
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	[16, 21]
Площадь лесов/Forest area	[22, 23]
Количество крупного рогатого скота/Beef amount	[24, 25]
Производство цемента/Cement production	[26]

Источник: составлено авторами на основе [6–26].  
Source: compiled by the authors based on [6–26].

Все предложенные факторы были разделены на две группы: макроэкономические и эколого-климатические (табл. 2). Макроэкономические оказывают косвенное влияние на деятельность отраслей с высокими выбросами парниковых газов в атмосферу и отражают общее социально-экономическое положение страны в определенный период. Эколого-климатические имеют тесную связь с выбросами углекислого газа от той или иной сферы деятельности.

Отдельного внимания требует такой фактор, как цена на углерод, который перешел из макроэкономической категории в эколого-климатическую, позволяющий определить склонность страны к снижению выбросов и ограничить негативное антропогенное воздействие на климат.

Цена на углерод – это стоимость единицы эмиссии парниковых газов, которая побуждает загрязнителей сократить количество выбросов парниковых газов в атмосферу. Иначе можно охарактеризовать как отрицательный внешний эффект – вредный продукт, который никак не оценивается никаким рынком [27]. Цена на углерод может быть оценена через прямое углеродное регулирование (система торговли выбросами (ETS) и углеродный налог) и косвенное регулирование (энергетические налоги) [16].

**Отбор факторов.** До построения модели панельных данных необходимо провести отбор факторов, чтобы исключить незначимые и избежать возможной мультиколлинеарности, которая будет влиять на оценку регрессии.

Первичным отбором факторов в работе был анализ корреляционной матрицы между объясняемой переменной и регрессорами. Все переменные,

имеющие корреляцию выше 0,6 [28], в дальнейший анализ не включаются. В результате были исключены следующие факторы: доля нефтегазовых доходов в бюджете страны, численность населения, инфляция, производство цемента.

**Таблица 2.** Разделение факторов по группам на макроэкономические и эколого-климатические

**Table 2.** Separation of factors by groups into macroeconomic and ecological and climatic

Группа факторов Group of factors	Наименование фактора Factor name	Единицы измерения Units
Макроэкономические Macroeconomic	Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	Доллары США US dollars
	Среднегодовая инфляция Average annual inflation	%
	Энергоемкость Energy intensity	Кг н.э./ доллар США Kg OE/USD
Эколого-климатические Ecological and climatic	Численность населения Population	Тысяч человек Thousands of people
	Цена на углерод Carbon price	Доллар США/т CO <sub>2</sub> USD /ton CO <sub>2</sub>
	Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	%
	Доля нефтегазовых доходов в бюджете страны Share of oil and gas revenues in the country budget	
	Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	Тысячи тонн Thousand tons
	Площадь лесов Forest area	км <sup>2</sup> km <sup>2</sup>
	Количество крупного рогатого скота Beef amount	шт./amount
Производство цемента Cement production	Тысячи тонн Thousand tons	

Источник: составлено авторами.  
Source: compiled by the authors.

Следующим шагом при отборе факторов была процедура Stepwise (метод последовательного отбора). Расчеты для данной процедуры и все дальнейшие статистические вычисления проводились в среде R-Studio.

В итоге осталось пять регрессоров: цена на углерод, доля ВИЭ в первичном потреблении энергии, ВВП, потребление бензина и площадь лесов. По данному набору факторов видно, что влияние на углеродоемкость имеют не только эколого-климатические, но и макроэкономические факторы, что может свидетельствовать о целесообразности комплексного подхода к управлению выбросами в

атмосферу. Реальные социально-экономические процессы не всегда могут быть описаны линейной моделью. В нашем случае для получения более обоснованных оценок ряд был сглажен, то есть был осуществлен переход к более сопоставимым значениям с использованием вместо исходных переменных логарифмов их показателей. Функция логарифма может быть использована, так как все значения положительны.

Для анализа влияния различных факторов на углеродоемкость с помощью эконометрического пакета R были построены три модели панельных данных для всех рассматриваемых стран. Первой была построена модель сквозной регрессии, результаты которой представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты расчетов модели сквозной регрессии

**Table 3.** Calculation results of the end-to-end regression model

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Константа/Constant	5,391***	0,326
Цена на углерод/Carbon price	-0,172***	0,003
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,307***	0,023
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,428***	0,026
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,187***	0,031
Площадь лесов/Forest area	0,187***	0,015
R <sup>2</sup>		0,533
Adj. R <sup>2</sup>		0,528

\*\*\* $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.  
 Source: compiled by the authors.

Расчеты показали, что все переменные, входящие в данную модель, значимы ( $p$ -value меньше 0,01). Значение  $R^2$  и скорректированного  $R^2$  невысокое, что свидетельствует о недостоверности модели. Перейдем к анализу моделей с индивидуальными эффектами.

Модель с фиксированными индивидуальными эффектами была оценена, результаты представлены в табл. 4.

В модели с фиксированными индивидуальными эффектами также все факторы оказались значимы, а высокий  $R^2$  может показывать, что данная модель достоверна и в нее включены все значимые факторы.

Результаты оценивания модели со случайными индивидуальными эффектами представлены в табл. 5.

**Таблица 4.** Результаты расчетов FE модели

**Table 4.** FE model calculation results

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Цена на углерод/Carbon price	-0,156***	0,001
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,169***	0,013
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,826***	0,019
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,379***	0,068
Площадь лесов/Forest area	0,266***	0,013
R <sup>2</sup>		0,949
Adj. R <sup>2</sup>		0,948

\*\*\* $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.  
 Source: compiled by the authors.

**Таблица 5.** Результаты расчетов RE модели

**Table 5.** RE model calculation results

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Константа/Constant	2,563***	0,403
Цена на углерод/Carbon price	-0,153***	0,010
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,170***	0,014
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,814***	0,012
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,393***	0,019
Площадь лесов/Forest area	0,276***	0,039
R <sup>2</sup>		0,949
Adj. R <sup>2</sup>		0,945

\*\*\* $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.  
 Source: compiled by the authors.

По итогам оценивания модели со случайными индивидуальными эффектами были получены коэффициенты, схожие с коэффициентами FE модели. Значение коэффициента детерминации также не отличается.

Проверка качества и тестирование моделей углеродоемкости экономик стран мира. Преимущества анализа панельных данных заключаются в том, что при их использовании снижается вероятность возникновения высоких стандартных ошибок, а использование моделей в логарифмах помогает бороться с гетероскедастичностью.

Для выбора наилучшей модели среди трех исходных были проведены три теста, результаты которых представлены в табл. 6.

**Таблица 6.** Тестирование моделей углеродоемкости  
**Table 6.** Testing carbon intensity models

F-тест F-test	Тест Хаусмана Houseman test	Тест Броша- Пэгана Brosh-Pagan test
H0: $f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n = 0$ .	H0: $corr(f_i; x_i) = 0$	H0: $\sigma_i^2 = 0$
F=4,26	Chisq=27,85	BP=51,062
p-value=1,051e-05	p-value<2,2e-16	p-value<2,2e-16

Источник: составлено авторами.  
 Source: compiled by the authors.

F-тест показал, что гипотеза отвергается, то есть присутствуют индивидуальные эффекты и между моделью сквозной регрессии и моделью с фиксированными эффектами лучше выбрать последнюю. Тест Броша–Пэгана отвергает гипотезу о том, что дисперсия случайных эффектов равна нулю. Это свидетельствует о том, что индивидуальные особенности стран существуют и модель со случайными эффектами лучше подходит для оценки параметров, чем модель сквозной регрессии. В то же время тест Хаусмана отвергает нулевую гипотезу, которая состоит в том, что оценки модели со случайными эффектами состоятельны. Следовательно, оценки модели с фиксированными эффектами являются наилучшими.

Анализ и интерпретация результатов построения модели. Исходя из результатов тестов, наилучшей моделью оказалась модель с фиксированными индивидуальными эффектами, следовательно, итоговые коэффициенты зависимости выглядят следующим образом:

$$CI_{it} = -0,156CP_{it} - 0,169REC_{it} - 0,826GDP_{it} + 0,379PC_{it} + 0,266FA_{it}.$$

При разработке качественной модели были отброшены незначимые факторы, но при этом в итоговом уравнении регрессии остались как макроэкономические, так и эколого-климатические регрессоры, также важным пунктом оказалась значимость фиксированных индивидуальных эффектов каждой страны, что может объясняться разницей в институциональном развитии и климатическом налогообложении.

Цена на углерод, как один из основных показателей развитости климатической политики в стране, имеет очевидное отрицательное влияние на углеродоемкость страны. Даже при малом коэффициенте данный показатель имеет влияние на объем выбросов CO<sub>2</sub> на единицу ВВП и отражает уровень развитости углеродного налога и ETS в конкретной стране.

Наибольшее влияние среди всех факторов имеет ВВП страны, что свидетельствует о важности развития всей экономики для расширения финансовой системы и привлечения дополнительных инвести-

ций в реализацию новых программ по сокращению выбросов углерода. Так как ВВП стоит в знаменателе при расчете углеродоемкости, то данная взаимосвязь может быть очевидной, но при этом нельзя однозначно сказать, что при росте ВВП сокращается углеродоемкость.

Особое внимание стоит уделить коэффициенту регрессии перед фактором «площадь лесов». С логической точки зрения данный коэффициент должен быть отрицательным, так как чем больше лесов в стране, тем больше углекислого газа они депонируют, а следовательно, меньше углеродоемкость. После эконометрических расчетов оказалось, что ситуация противоположная. Это связано с недостаточным контролем над лесными массивами, из-за чего каждый год происходят масштабные пожары как в США, так и на территории Европы и высвобождается громадные объемы углекислого газа. Также нельзя не упомянуть незаконную вырубку деревьев и загрязнение лесополосы радиоактивным мусором, за счет чего деревья снижают свой секвестрационный потенциал.

При более детальном анализе выявлено, что такой выброс дают данные по Канаде, у которой наибольший положительный коэффициент при FA (156,7). Такое отрицательное влияние лесов на углеродоемкость Канады вызвано ежегодными крупными пожарами, площадь которых превышает 3 млн гектар в год, при этом в 44 % случаев причина возникновения огня – молния, а человеческий фактор составляет всего 2 %, что говорит об эффективной борьбе с лесными пожарами в местах пребывания людей. Второй по значимости причиной снижения секвестрационного потенциала лесов Канады является негативное влияние насекомых-вредителей.

Исходя из анализа полученного уравнения регрессии можно сказать, что лишь комплексный подход к изменению экономик мира сможет глобально изменить динамику негативного воздействия человека на природу. Стоит развивать не только отраслевые компоненты, такие как повышение доли возобновляемых источников энергии в общем производстве энергии, но и глобальную экономику страны, финансовую систему, производство «зеленых» автомобилей и иных устройств, которые не будут загрязнять природу. При должном внимании каждой отдельной отрасли и осознанном потреблении энергоресурсов удастся сохранить не только большое количество лесов, но и улучшить состояние воздуха на территории многих стран.

#### Обсуждение и заключение

Длительный процесс антропогенного воздействия на экологию и климат Земли привели к суще-

ственному ухудшению состояния воздуха, воды и почвы в местах проживания большого количества людей. Общественное давление и ряд научных исследований послужили побудительными мотивами для государств активно проводить климатическую политику и разрабатывать инструменты климатического регулирования.

Экономические инструменты уже на протяжении долгого времени являются главной составляющей климатической и экологической политики большинства стран. Основываясь на опыте других стран, многие государства продолжают предпринимать меры по введению инициатив по ограничению выбросов парниковых газов от сжигания ископаемых топлив, даже с учётом текущей геополитической ситуации. Со временем инициативы приведут к сокращению негативного влияния «грязных» производств на экологию и климат, а также позволят возобновляемым источникам энергии заместить ископаемое топливо в отраслях и видах экономической деятельности, где это технологически и экономически оправдано.

В настоящей работе была проверена гипотеза об отрицательном влиянии цены на углерод на углеродоемкость экономики стран с использованием метода панельных данных. Оценка различных спецификаций моделей показала, что данная гипотеза подтвердилась, что говорит о важности развития климатической политики внутри каждой страны и благоприятной перспективе введения новых инструментов по регулированию выбросов. Также было определено, что ВВП, как общий показатель развития всей экономики, имеет наибольшее влияние на сокращение углеродоемкости. При этом для сокращения отношения выбросов углекислого газа к валовому внутреннему продукту можно наращивать долю энергии, полученной от возобновляемых источников энергии, в потреблении, сокращать или замещать низкоуглеродными источниками энергии потребление бензина на транспорте, а также сохранять площадь лесов и своевременно предотвращать лесные пожары. Учитывая, что возобновляемые источники энергии в России развиваются по принципу энергообеспечения регионов, преимущественно удалённых от энергетической и транспортной инфраструктуры, их дальнейшее развитие представляется авторам целесообразным и экономически важным.

Россия не была включена в расчётную базу, так как в настоящее время климатическое регулирование и правовое ограничение выбросов углекислых газов ещё недостаточно развито. Так как Россия находится в пятерке стран по выбросам парниковых газов, важно проводить мягкую климатическую политику, при этом учитывая особенности структуры потребления энергетических ресурсов с

преобладающей долей ископаемых источников энергии. Это влияет не только на углеродоемкость государства, но и на конкурентоспособность отечественных товаров на мировых рынках.

Одним из шагов по развитию климатической политики в России можно считать «сахалинский эксперимент», целью которого стало достижение углеродной нейтральности на территории острова Сахалин к концу 2025 г. Объем выбросов парниковых газов в регионе в 2021 г. составил 12,3 млн т CO<sub>2</sub>, поглощения – 11,1 млн т. Эта разница в 10 % и должна сократиться за время эксперимента. Для этого региону придется перевести 145 котельных с угля на газ (что сократит в 1,5 раза количество выбрасываемого углекислого газа в атмосферу), повысить долю экологичного транспорта до 50 %, а также увеличить долю электроэнергии от ВИЭ в потреблении.

Еще одним показателем, отражающим процесс развития мероприятий в области климатической политики в России, является увеличение доли электрической энергии, произведённой из возобновляемых источников энергии, в общем объеме производства электрической энергии. Правительство РФ планирует нарастить долю ВИЭ в энергобалансе страны с 1 до 10 % к 2040 г., что можно сделать в большей степени вследствие сокращения доли угольных энергогенераций с 15 до 7 %, а объем капитальных вложений в развитие «зеленых» энергоустановок может составить 1 трлн р. до 2035 г.

Ввиду высокого значения для климата и экологии количества высаженных деревьев многие отечественные компании и учреждения устраивают совместные акции по высадке саженцев. После массивных лесных пожаров летом 2010 г. был введен всероссийский день посадки леса с целью привлечения внимания населения к проблеме исчезновения леса и к посадке новых растений. За несколько лет количество ежегодно высаживаемых деревьев возросло с 150 тысяч до 4,5 млн саженцев. Похожая акция была у авиакомпании «Сибирь» в 2020 г., когда чуть более чем за месяц авиапассажиры и другие неравнодушные граждане собрали средства на посадку миллиона деревьев. Только за последние 20 лет, благодаря таким акциям и не только, количество лесной площади увеличилось на 100 тыс. кв. км.

Рассмотрением различных экологических проблем занимаются специализированные министерства и комиссии, такие как Госкомэкология России, Росгидромет, Минсельхоз РФ и др. Помимо общероссийских ведомств, в каждой отрасли функционируют организации, которые распространяют «зеленый» образ жизни, устраивают публичные экоакции и способствуют улучшению состояния окружающей среды. С 2014 г. действует государ-



ственная программа «Охрана окружающей среды», целью которой является улучшение состояние воздуха в городах, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и биосферу страны, создание новых особо охраняемых природных территорий.

Одно из первых обществ по защите природы появилось в России в 1924 г. – Всероссийское общество охраны природы. Именно эта организация занималась озеленением территорий после Второй мировой войны. В настоящее время принимает непосредственное участие в защите водоемов от загрязняющей деятельности фабрик и заводов. Помимо государственных организаций, на территории России присутствуют и международные экологические организации.

В связи с текущей геополитической обстановкой многие экологические и климатические проекты могут быть заморожены на неопределенный срок, что даст дополнительное время на подготовку необходимых нормативно-правовых документов, осуществление их внедрения на территории страны и проведение ряда пилотных климатических проектов.

Сформировать кардинально новую систему эколого-климатического регулирования и разработать соответствующую политику, вводя новые инструменты по ограничению выбросов парниковых газов

и загрязняющих веществ в атмосферу (которое постепенно приведет к изменению межтопливной конкуренции в сторону снижения доли углеводородов), не представляется возможным без детального анализа действующего базиса фискального регулирования топливно-энергетического комплекса.

Отдельно стоит рассмотреть возможность поэтапного изменения существующих ценовых сигналов путем повышения их эколого-климатической эффективности взамен введения отдельных инструментов, которые будут дополнительным грузом для уже устоявшейся эффективной налоговой конструкции в стране. Один из вариантов модификации заключается в изменении налоговой базы по углеродному налогу с количества использованной энергии на объем углерода, содержащегося в топливе, или на объем углерода, который выделяется при сжигании ископаемого топлива.

Такой метод позволит избежать высоких издержек администрирования системы торговли выбросами и издержек по внедрению нового углеродного налога, а также не создаст коррупционных стимулов для продажи углерода по заниженным ценам. Тем не менее необходимо дальнейшее развитие этого направления исследования с учетом всех экономических рисков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weitzman M.L. Prices vs. quantities // *The review of economic studies*. – 1974. – Vol. 41. – № 4. – P. 477–491.
2. Pizer W.A. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change // *Journal of public economics*. – 2002. – Vol. 85. – № 3. – P. 409–434.
3. Goulder L.H., Parry I.W. Instrument choice in environmental policy // *Review of environmental economics and policy*. – 2008. – Vol. 2 (2). – P. 152–174.
4. Goulder L.H., Schein A.R. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review // *Climate Change Economics*. – 2013. – Vol. 4. – № 03. – P. 1350010.
5. Башмаков И.А. Налог на углерод в системе налогов на энергию и экологических налогов // *Экологический вестник России*. – 2018. – № 3. – С. 1–13.
6. Бразовская В.В., Гутман С.С. Возобновляемая энергетика как фактор достижения устойчивого развития стран мира // *Цифровая экономика, умные инновации и технологии: Сборник трудов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с зарубежным участием*. – СПб, 18–20 апреля 2021. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 26–28.
7. Изменение климата и неравенство: потенциал для совместного решения проблем / Л.М. Григорьев, И.А. Макаров, А.К. Соколова, В.А. Павлюшина, И.А. Степанов // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 7–30.
8. Lin B., Benjamin N.I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry. A new evidence from quantile regression analysis // *Journal of cleaner production*. – 2017. – Vol. 150. – P. 175–187.
9. Provincial carbon intensity abatement potential estimation in China: a PSO-GA-optimized multi-factor environmental learning curve method / S. Yu, J. Zhang, S. Zheng, H. Sun // *Energy Policy*. – 2015. – Vol. 77. – P. 46–55.
10. Shao Y. Does FDI affect carbon intensity? New evidence from dynamic panel analysis // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. – 2017. – Vol. 10. – № 1. – P. 27–42.
11. Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention / B. Yu, X. Li, Y. Qiao, L. Shi // *Journal of Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 28. – P. 137–147.
12. Arlinghaus J. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? // *Geosystem Engineering*. – 2014. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 1–10.
13. Макаров И.А., Соколова А.К. Оценка углеродоемкости внешней торговли России // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. – 2014. – Т. 18. – № 3. – С. 477–507.
14. Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis / Q. Wang, Y. Hang, B. Su, P. Zhou // *Energy Economics*. – 2018. – Vol. 70. – P. 12–25.
15. The reformed EU ETS-intertemporal emission trading with restricted banking / J. Bocklet, M. Hintermayer, L. Schmidt, T. Wildgrube // *Energy Economics*. – 2019. – Vol. 84. – P. 104486.

16. Степанов И.А. Налоги в энергетике и их роль в сокращении выбросов парниковых газов // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 290–313.
17. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014 / S. Churchill, J. Inekwe, R. Smyth, X. Zhang // Energy Economics. – 2019. – Vol. 80. – P. 30–37.
18. Вольников Р.М., Мурашова Н.А. Инструменты регулирования выбросов парниковых газов в ЕС // Актуальные вопросы экономики, менеджмента и инноваций: Материалы Международной научно-практической конференции ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов, студентов. – Нижний Новгород, 17 ноября 2021. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 360–364.
19. Кузовкин А.И. Углеродоемкость природного газа и электроэнергии, развитие ВИЭ в России и за рубежом // Микроэкономика. – 2021. – № 3. – С. 57–64.
20. Маликова О.И., Кирюшин П.А., Николаева А.В. Технологические детерминанты трансформации возобновляемой энергетики и государственной поддержки развития энергетической отрасли // Управленческие науки. – 2021. – № 1. – С. 35–50.
21. Восстановительный рост экономики России и выбросы парниковых газов / А.А. Голуб, М.Г. Колосницына, Д.В. Дякин, Д.А. Шапошников // Экономическая политика. – 2007. – № 2. – С. 179–195.
22. Коробова О.С., Михина Т.В. Влияние экономических и природных факторов на углеродоемкость страны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – Т. 16. – № 1. – С. 243–252.
23. Пакина А.А., Тульская Н.И. Оценка углеродоемкости экономики Татарстана в целях управления природопользованием // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – № 2. – С. 110–115.
24. Озерова М.Г., Филимонова Н.Г. Декарбонизация сельского хозяйства России: основные аспекты // Научно-практические аспекты развития АПК: Материалы национальной научной конференции. – Красноярск, 12 ноября 2021. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. – С. 135–137.
25. Lean I.J., Moate P.J. Cattle, climate and complexity: food security, quality and sustainability of the Australian cattle industries // Australian veterinary journal. – 2021. – Vol. 99. – Iss. 7. P. 293–308.
26. Применение концепции наилучших доступных технологий в различных системах зеленого финансирования: международный опыт и перспективы использования в государствах-членах Евразийского экономического союза / Д.О. Скобелев, А.А. Волосатова, Т.В. Гусева, С.В. Панова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 36–55.
27. Hagmann D., Ho E., Loewenstein G. Nudging out support for a carbon tax // Nature Climate Change. – 2019. – Vol. 9. – № 6. – P. 484–489.
28. Эконометрия / В.И. Сулов, Н.М. Ибрагимов, Л.П. Талышева, А.А. Цыплаков. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 2005. – 742 с.

#### Информация об авторах

**Ирина Викторовна Проворная**, кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Центр экономики недропользования нефти и газа» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. provornayaiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6581-2921>

**Ирина Викторовна Филимонова**, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Центр экономики недропользования нефти и газа» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. filimonovaiv@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4447-6425>

**Арина Денисовна Крутилина**, студент, Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 1. a.krutilina@g.nsu.ru

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 07.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

#### REFERENCES

1. Weitzman M.L. Prices vs. quantities. *The review of economic studies*, 1974, vol. 41 (4), pp. 477–491.
2. Pizer W.A. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. *Journal of public economics*, 2002, vol. 85 (3), pp. 409–434.
3. Goulder L.H., Schein A. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. *Climate Change Economics*, 2013, vol. 4, no. 03, pp. C. 1350010 (1–28).
4. Goulder L.H., Parry I.W. Instrument choice in environmental policy. *Review of environmental economics and policy*, 2008, vol. 2 (2), pp. 152–174.
5. Bashmakov I.A. Carbon tax in the system of taxes on energy and environmental taxes. *Ecological Bulletin of Russia*, 2018, no. 3. pp. 1–13. (In Russ.)
6. Brazovskaya V.V., Gutman S.S. Renewable energy as a factor in achieving sustainable development of the countries of the world. *Digital economy, smart innovations and technologies technologies. Proceedings of the National (All-Russian) scientific and practical conference with foreign participation*. St. Petersburg, April 18–20, 2021. St. Petersburg, Polytech Press, 2021. pp. 26–28. (In Russ.)

7. Grigoriev L.M., Makarov I.A., Sokolova A.K., Pavlyushina V.A., Stepanov I.A. Climate change and inequality: potential for joint problem solving. *Bulletin of international organizations: education, science, new economy*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 7–30. (In Russ.)
8. Lin B., Benjamin N.I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry. A new evidence from quantile regression analysis. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 150, pp. 175–187.
9. Yu S., Zhang J., Zheng S., Sun H. Provincial carbon intensity abatement potential estimation in China: a PSO–GA-optimized multi-factor environmental learning curve method. *Energy Policy*, 2015, vol. 77, pp. 46–55.
10. Shao Y. Does FDI affect carbon intensity? New evidence from dynamic panel analysis // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 27–42.
11. Yu B., Li X., Qiao Y., Shi L. Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 28, pp. 137–147.
12. Arlinghaus J. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? *Geosystem Engineering*, 2014, vol. 17, Iss. 1, pp. 1–10.
13. Makarov I.A., Sokolova A.K. Assessing the carbon intensity of Russia's foreign trade *Economic Journal of the Higher School of Economics*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 477–507. (In Russ.)
14. Wang Q., Hang Y., Su B., Zhou P. Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis. *Energy Economics*, 2018, vol. 70, pp. 12–25.
15. Bocklet J., Hintermayer M., Schmidt L., Wildgrube T. The reformed EU ETS-intertemporal emission trading with restricted banking. *Energy Economics*, 2019, vol. 84, pp. 104486.
16. Stepanov I.A. Taxes in the energy sector and their role in reducing greenhouse gas emissions. *Economic Journal of the Higher School of Economics*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 290–313. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17323/1813-8691-2019-23-2-290-313>.
17. Churchill S., Inekwe J., Smyth R., Zhang X. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014. *Energy Economics*, 2019, vol. 80, pp. 30–37.
18. Volnikov R.M., Murashova N.A. Instruments for regulating greenhouse gas emissions in the EU. *Topical issues of economics, management and innovation: Materials of the International Scientific and Practical Conference of Scientists, specialists, university professors, graduate students, students*. Nizhny Novgorod, November 17, 2021. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Publ., 2021. pp. 360–364. (In Russ.)
19. Kuzovkin A.I. Carbon intensity of natural gas and electricity, development of renewable energy sources in Russia and abroad. *Microeconomics*, 2021, no. 3, pp. 57–64. (In Russ.)
20. Malikova O.I., Kiryushin P.A., Nikolaeva A.V. Technological determinants of the transformation of renewable energy and state support for the development of the energy industry. *Management Sciences*, 2021, no. 1, pp. 35–50. (In Russ.)
21. Golub A.A., Kolosnitsyna M.G., Dyakin D.V., Shaposhnikov D.A. Recovery growth of the Russian economy and greenhouse gas emissions. *Economic Policy*, 2007, no. 2, pp. 179–195. (In Russ.)
22. Korobova O.S., Mikhina T.V. Influence of economic and natural factors on the carbon intensity of the country. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2008, vol. 16, no. 1, pp. 243–252. (In Russ.)
23. Pakina A.A., Tulskeya N.I. Estimation of the carbon intensity of the economy of Tatarstan for the purpose of environmental management. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2021, no. 2, pp. 110–115. (In Russ.)
24. Ozerova M.G., Filimonova N.G. Decarbonization of agriculture in Russia: main aspects. *Scientific and practical aspects of the development of the agro-industrial complex. Materials of the national scientific conference*. Krasnoyarsk, November 12, 2021. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 2021. pp. 135–137. (In Russ.)
25. Lean I.J., Moate P.J. Cattle, climate and complexity: food security, quality and sustainability of the Australian cattle industries. *Australian veterinary journal*, 2021, vol. 99, Iss. 7, pp. 293–308.
26. Skobelev D.O., Volosatova A.A., Guseva T.V., Panova S.V. Application of the concept of the best available technologies in various green finance systems: international experience and prospects for use in the member states of the Eurasian Economic Union. *Bulletin of Eurasian Science*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 36–55.
27. Haggmann D., Ho E.H., Loewenstein G. Nudging out support for a carbon tax. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 484–489.
28. Suslov V.I., Ibragimov N.M., Talysheva L.P., Tsyplakov A.A. *Econometrics*. Novosibirsk, Novosibirsk University Publ. House, 2005. 742 p.

### Information about the authors

**Irina V. Provornaya**, Cand. Sc., Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. provornayaiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6581-2921>

**Irina V. Filimonova**, Dr. Sc., Professor, Leading Researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. filimonovaiv@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4447-6425>

**Arina D. Krutilina**, Student, Novosibirsk State University, 1, Pirogov avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. a.krutilina@g.nsu.ru

Received: 11.07.2023

Revised: 07.09.2023

Accepted: 19.04.2024