

53. РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Чаюк Я.С., студент гр. 272303

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

Хацкевич Г.А. – доктор экономических наук, профессор каф. ЭИ

Аннотация. В статье рассматривается построение эконометрической модели оценки показателей экономической безопасности Республики Беларусь на основе данных временных рядов за период 2002–2023 гг. Применяется современный аппарат эконометрического моделирования на базе пакетов прикладных программ по эконометрике. В качестве универсального индикатора состояния экономики используется ВВП по ППС на душу населения, а в качестве факторов влияния — показатели, отражающие развитие информационно-коммуникационных технологий и инновационной активности. Для учёта как краткосрочных, так и долгосрочных взаимосвязей между переменными построена модель коррекции ошибок (ЕСМ), подтвержденная тестами на адекватность, гетероскедастичность, автокорреляцию и нормальность остатков. Полученные результаты указывают на значимое влияние экспортного потенциала и научно-исследовательской активности на экономическое развитие страны и могут быть использованы при формировании стратегий обеспечения экономической безопасности.

Ключевые слова: эконометрическое моделирование, регрессионный анализ, модель коррекции ошибок, экономическая безопасность, инновационная активность, научные исследования и разработки.

Экономический суверенитет государства основывается, прежде всего, в обеспечении его экономической безопасности. Следовательно, построение регрессионной модели зависимости между некоторыми факторами экономической безопасности способствует ее лучшему обеспечению и прогнозированию.

Безусловно, существует множество факторов, отражающих экономическую безопасность государства, однако в качестве эндогенной переменной было решено использовать универсальный показатель оценки текущего состояния развития страны: темп роста валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения по паритету покупательной способности (ППС) (gross domestic product (GDP) per capita (purchasing power parity (PPP))) (%). А в качестве экзогенных переменных (регрессоров) было выбрано 5 показателей: доля экспорта товаров информационно-коммуникационных технологий (ИКТ)

(%) – information and communication technologies (ICT) goods export, доля экспорта услуг ИКТ (%) – ICT service export, удельный вес отгруженной инновационной продукции на внутренний рынок (%) – shipped innovative products, уровень инновационной активности организаций промышленности (%) – innovation activity of organizations, доля внутренних затрат на научные исследования и разработки (НИР) в ВВП (%) – research development. Все регрессоры были выбраны исходя из указа Президента Республики Беларусь № 135 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 годы» (research development) [1], Концепции национальной безопасности Республики Беларусь (research development) [2], индикаторов оценки состояния национальной безопасности (ICT goods export, ICT service export) [3], значимости интеллектуального капитала в неоиндустриальную эпоху и формирования модели экономики «Беларусь Интеллектуальная» (shipped innovative products) [4].

Было решено построить регрессионную модель на основе временных рядов, включающих годовые данные показателей с 2002 г. по 2023 г. включительно (т. е. 22 наблюдений). Значения показателей были найдены на международных статистических ресурсах и в официальной статистике Республики Беларусь [5-7]. Построение модели проводилось в прикладном программном пакете EViews [8].

В качестве альтернативной эндогенной переменной было решено выбрать логарифмированный $\ln(\text{GDP per capita(PPP)})$. Переход к логарифмированию объясняется тем, что производная натурального логарифма переменной соответствует её темпу роста. Это делает возможным интерпретацию изменений переменной через относительные приросты, а не через абсолютные изменения. Поскольку все экзогенные и эндогенные переменные выражены в процентах, использование логарифмов позволяет выстраивать более корректные линейные зависимости между ними, а также снижает влияние возможных выбросов и гетероскедастичности. Дополнительно логарифмирование улучшает свойства временных рядов с точки зрения коинтеграции и усиливает выявление устойчивых взаимосвязей.

Таким образом, было решено построить логарифмически-линейную модель, где в качестве эндогенной переменной использовали $\ln(\text{GDP per capita(PPP)})$ ввиду коинтеграции временных рядов. Применялась двухшаговая процедура Энгла–Грейнджера: на первом этапе путём регрессии $\ln(\text{GDP per capita(PPP)})$ на экзогенные переменные были получены оценки коэффициентов долгосрочной связи. Затем на основе остатков этой регрессии формировалась модель краткосрочной динамики в виде модели коррекции ошибок (ECM), что позволяет учитывать как краткосрочные колебания, так и долгосрочное равновесие между переменными [11]. Выбор логарифмической формы модели обусловлен более высокой корреляционной связью между переменными, что представлено на рисунке 1.

Correlation						
	LNGDP PER	ICT GOODS ...	ICT SERVICE.	INN ACTIVITY	SHIPPED INN PR..	RESEARCH DE
LNGDP PER CA...	1.000000	-0.060049	0.849241	0.869180	0.870299	-0.508639
ICT GOODS EXP...	-0.060049	1.000000	0.401267	0.314065	-0.158014	-0.440739
ICT SERVICE EX	0.849241	0.401267	1.000000	0.899769	0.672287	-0.655914
INN ACTIVITY	0.869180	0.314065	0.899769	1.000000	0.669700	-0.534066
SHIPPED INN PR...	0.870299	-0.158014	0.672287	0.669700	1.000000	-0.340573
RESEARCH DEV...	-0.508639	-0.440739	-0.655914	-0.534066	-0.340573	1.000000

Рисунок 1 – Корреляционная матрица

Исходя из результатов, полученных после построения корреляционной матрицы, было решено исключить экзогенную переменную ICT service export из модели по причине сильной корреляционной зависимости с экзогенной переменной innovation activity of organizations [9-10].

Для дальнейшего применения модели коррекции ошибок (ECM) необходимо проверить временные ряды на стационарность, то есть на наличие единичного корня с помощью ADF-теста или KPSS-теста. При подтверждении одинаковой степени интегрируемости временных рядов будет проведён синтез долговременной регрессионной зависимости между переменными. Результаты тестов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты ADF-теста

№п/п	Переменная	ADF-статистика	p-value	Критическое значение	Вывод
1	ln(GDP per capita(PPP))	-1.371	0.575	-3.012	I(1)
2	ICT goods export	-1.569	0.480	-3.012	I(1)
3	shipped innovative products	-2.170	0.258	-3.012	I(1)
4	innovation activity of organizations	-0.157	0.930	-3.012	I(1)
5	research development	-2.013	0.279	-3.012	I(1)

Проведённые тесты подтвердили наличие нестационарности на уровнях и стационарности в первых разностях, что позволяет сделать вывод о интегрируемости временных рядов порядка I(1) и обоснованности дальнейшего построения модели коррекции ошибок [11].

В качестве метода построения модели коррекции ошибок был выбран метод наименьших квадратов (МНК). При этом для корректности оценки параметров модели необходимо выполнение ряда классических предпосылок [9].

П.1. Отсутствие систематических ошибок наблюдений уравнения регрессии:

$$M\{\varepsilon_t\} = 0, \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

Другими словами, при операции усреднения переменных моделей, влияние случайной переменной исчезает.

П.2. Наблюдения организованы так, что случайные ошибки не коррелированы между собой:

$$M\{\varepsilon_t \cdot \varepsilon_\tau\} = 0, \quad t \neq \tau, \quad t, \tau = 1, \dots, T.$$

П.3. Наблюдения производятся с одинаковой точностью, т.е. дисперсии случайных переменных одинаковы во все моменты измерения:

$$D\{\varepsilon_t\} = \sigma^2, \quad t = 1, \dots, T.$$

Предположение П.3 носит название гомоскедастичности.

П.4. Экзогенные переменные измеряются без ошибок, и в случае модели множественной регрессии их значения, полученные на протяжении всех моментов наблюдения, образуют линейно-независимые векторы (отсутствие мультиколлинеарности).

П.5. Закон распределения вероятностей случайной переменной принадлежит к классу нормальных распределений с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , которая чаще всего неизвестна.

Отчёт о построении модели коррекции ошибок (ECM) представлен на рисунке 2.

Dependent Variable: D(LNGDP_PER_CAPITA_PPP)				
Method: Least Squares				
Date: 04/10/25 Time: 00:09				
Sample (adjusted): 2006 2023				
Included observations: 18 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob
C	-2.998731	0.318671	-9.410117	0.0000
D(ICT_GOODS_EXPORT)	0.130964	0.037258	3.515053	0.0038
D(R_D)	0.372388	0.061758	6.029774	0.0000
ECT	-0.279396	0.029014	-9.629617	0.0000
D(INN_ACTIVITY(-3))	-0.006731	0.002093	-3.215825	0.0068
R-squared	0.888476	Mean dependent var	0.064484	
Adjusted R-squared	0.854160	S.D. dependent var	0.052174	
S.E. of regression	0.019925	Akaike info criterion	-4.763574	
Sum squared resid	0.005161	Schwarz criterion	-4.516249	
Log likelihood	47.87217	Hannan-Quinn criter.	-4.729472	
F-statistic	25.89158	Durbin-Watson stat	1.803448	
Prob(F-statistic)	0.000004			

Рисунок 2 – Отчет по построению ECM-модели ln(GDP per capita(PPP)) с четырьмя регрессорами

Как видно из данного отчета, значимыми на уровне $\alpha=0,05$ являются константа и все экзогенные переменные, а также переменная ECT, которая отражает долгосрочные зависимости экзогенных переменных от эндогенных. Таким образом, в результате последовательных исключений переменных была получена модель зависимости с 4 регрессорами – ICT goods, research development, innovation activity of organizations с лагом 3 года и ECT.

В результате эконометрического анализа была построена следующая модель:

$$\Delta y_t = -0,279(\bar{y}_{t-1} + 1,069x_{1,t-1} - 0,051x_{2,t-1} - 0,029x_{3,t-1} + 2,871x_{4,t-1}) - 2,999 + 0,131\Delta x_{1,t} - 0,007\Delta x_{2,t-3} + 0,372x_{4,t},$$

где x_1 – ICT goods export, x_2 – innovation activity of organizations, x_3 – shipped innovative products, x_4 – research development, y – ln (GDP per capita(PPP)).

В полученной модели все коэффициенты модели являются значимыми на уровне значимости 0,05. Если говорить про адекватность модели (мера качества), которая основывается на оценке коэффициента детерминации, то модель является адекватной ($R^2=0,8885$, скорректированный $R^2=0,8542$) и значимой в целом, что подтвердилось с помощью Р-значения по Фишеру (0,00004).

Для проверки оценок на несмещенность, эффективность и состоятельность необходимо проверить модель на отсутствие мультиколлинеарности, автокорреляции, гетероскедастичности, а также проверить нормальность остатков.

Мультиколлинеарность можно опровергнуть путем расчета Variance Inflation Factor (VIF) в EViews с помощью встроенного анализа. Так, $VIF=1,203$, что меньше 5 и говорит об отсутствии мультиколлинеарности, результаты теста приведены на рисунке 3.

Variance Inflation Factors			
Date: 04/26/25 Time: 16:36			
Sample: 2002 2023			
Included observations: 18			
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF
C	0.101551	4604.383	NA
D{ICT_GOODS_EX...	0.001388	1.532247	1.509791
D{R_D}	0.003814	1.876964	1.858127
ECT	0.000842	4608.309	2.279085
D{INN_ACTIVITY(-3)}	4.38E-06	1.295620	1.202855

Рисунок 3 – Результаты количественной оценки VIF

Для проверки модели на гетероскедастичность было решено использовать тест Вайта и тест Броуша-Пагана-Годфри. Нулевая гипотеза об отсутствии гетероскедастичности принимается на всех уровнях значимости. Результаты тестов представлены на рисунках 4 и 5.

Heteroskedasticity Test: White			
F-statistic	0.698919	Prob. F(14,3)	0.7242
Obs*R-squared	13.77626	Prob. Chi-Square(14)	0.4665
Scaled explained SS	2.780937	Prob. Chi-Square(14)	0.9994

Рисунок 4 – Результаты теста Вайта на гетероскедастичность

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey			
F-statistic	1.162648	Prob. F(4,17)	0.3618
Obs*R-squared	4.725644	Prob. Chi-Square(4)	0.3166
Scaled explained SS	1.140615	Prob. Chi-Square(4)	0.8878

Рисунок 5 – Результаты теста Броуша-Пагана- Годфри на гетероскедастичность

Если говорить про автокорреляцию остатков, то была проведена проверка с помощью теста Броуша-Годфри, а также были найдены критические значения распределения Дарбина-Уотсона для проверки модели на автокорреляцию. Так, результаты Бройша-Годфри свидетельствуют об отсутствии автокорреляции до 5 лага. Значение критерия Жака-Бера составляет 1,192, p-value=0,551, что говорит о принятии нулевой гипотезы о нормальном распределении остатков модели [9, 11]. Результаты этих тестов представлены на рисунках 6 и 7.

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:			
F-statistic	0.408988	Prob. F(5,8)	0.8302
Obs*R-squared	3.664423	Prob. Chi-Square(5)	0.5987

Рисунок 6 – Результаты теста Броуша-Годфри на автокорреляцию

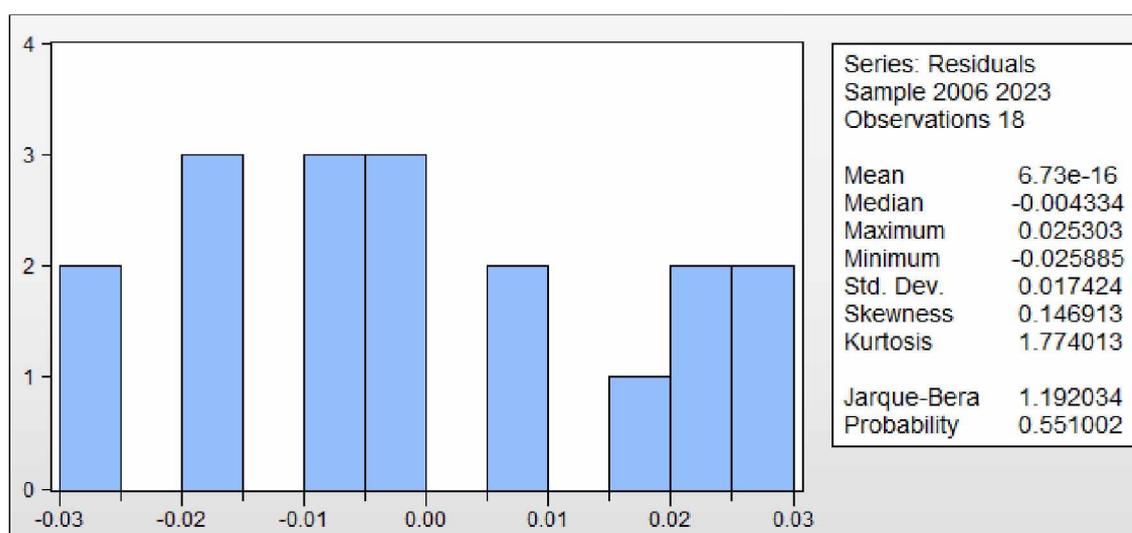


Рисунок 7 – Результаты теста Жака-Бера на автокорреляцию

Использование модели коррекции ошибок позволило более точно учесть как краткосрочные эффекты изменения факторов (экспорт товаров ИКТ, инновационная активность организаций, выпуск инновационной продукции, затраты на НИР), так и восстановление долгосрочного равновесия между ними. Положительный знак коэффициента при экспорте товаров ИКТ в краткосрочном уравнении (0,131) указывает на то, что увеличение доли экспорта товаров ИКТ способствует росту $\ln(\text{GDP per capita(PPP)})$. Отрицательный знак коэффициента при изменении инновационной активности организаций с лагом в 3 года (-0,007) свидетельствует о наличии запаздывающего эффекта, когда результаты инновационной активности не оказывают немедленного положительного влияния на экономический рост. Положительный коэффициент при затратах на НИР (0,372) показывает, что увеличение инвестиций в научные исследования напрямую способствует росту ВВП на душу населения. Отрицательный коэффициент при ошибке долгосрочного равновесия (-0,279) указывает на корректировку примерно 28% отклонения от равновесного состояния в каждом периоде, что подтверждает наличие устойчивой долгосрочной связи между переменными.

Для оценки качества прогноза модели был построен ретроспективный прогноз $\ln(\text{GDP per capita(PPP)})$ на период 2006-2023 годы и рассчитана средняя абсолютная процентная ошибка (APE). Результаты представлены на рисунке 8.

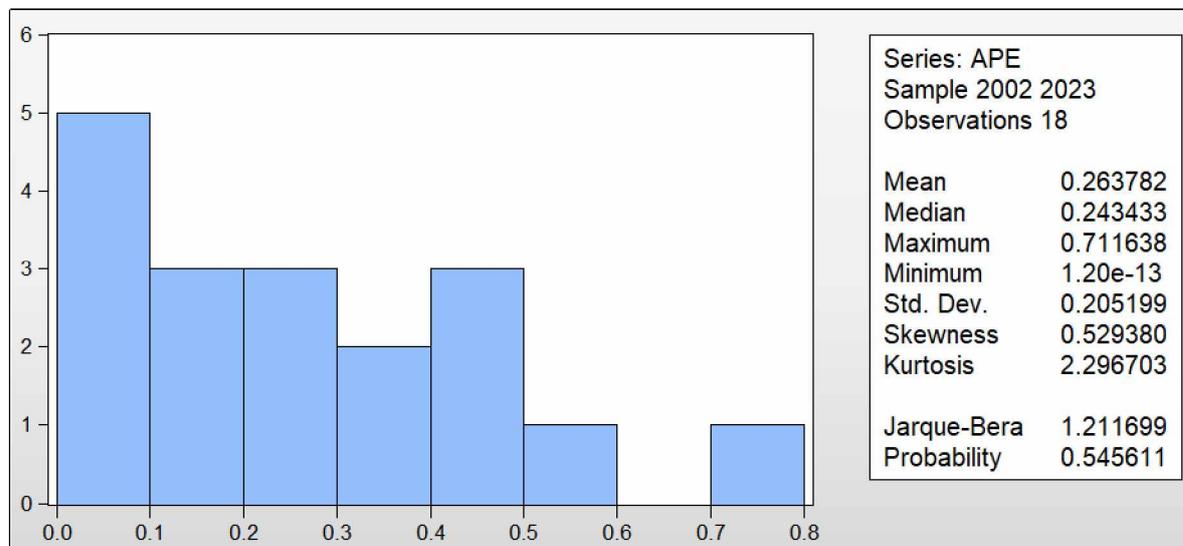


Рисунок 8 – Результаты оценки средней абсолютной процентной ошибки

Результаты расчётов показали, что средняя абсолютная процентная ошибка (APE) составила 26,4%, а значит модель обеспечивает приемлемую точность прогнозирования, что подтверждает возможность её практического применения для анализа и прогнозирования динамики экономического развития.

Таким образом, построенная модель позволяет не только выявить влияние отдельных факторов на экономическую динамику, но и использовать её для ретроспективного анализа и построения прогнозов, что имеет важное значение для разработки эффективной экономической политики и программ обеспечения экономической безопасности Республики Беларусь.

Список использованных источников:

1. Указ Президента Республики Беларусь от 1 апр. 2025 г. № 135 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 годы» // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2025. – 2 апр. – № 1/21345. – Режим доступа: <https://pravo.by>. – Дата доступа: 5.04.2025.
2. Решение Всебелорусского народного собрания от 25 апр. 2024 г. № 5 «Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь» // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2024. – 26 апр. – № 1/21000. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P924v0005>. – Дата доступа: 5.04.2025.
3. КОНОНОВИЧ, Е. Достойный ответ на вызовы времени: [что обсуждали на заседании Совета Безопасности с участием Лукашенко] / Е. Кононович, П. Конога // СБ Беларусь Сегодня. – 2025. – 3 апр. – URL: <https://www.sb.by/articles/dostoynyy-otvet-na-vyzovy-vremeni-zasedanie-sovbez.html>. – Дата доступа: 5.04.2025.
4. СТРАТЕГИЯ «НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ: 2018–2040» [Электронный ресурс]: постановление Президиума Нац. акад. наук Беларуси. 26 февр. 2018 г., № 17 // Нац. акад. наук Беларуси. – Режим доступа: https://nasb.gov.by/congress2/strategy_2018-2040.pdf. – Дата доступа: 17.02.2025.
5. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 18.02.2025.
6. Belarus [Электронный ресурс] // International Monetary Fund. – Режим доступа: <https://www.imf.org/en/Countries/BLR>. – Дата доступа: 18.02.2025.
7. International Labour Organization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ilostat.ilo.org/data/>. – Дата доступа: 18.02.2025.
8. EViews User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eviews.com/EViews12/ev12help/index.html>. – Дата доступа: 23.02.2025.
9. Хацкевич, Г. А. Эконометрика: учебник / Г. А. Хацкевич, Т. В. Русилко. – Минск: РИВШ, 2021. – 452 с.
10. Проневич, А. Ф. Научно-технический прогресс и нейтральность по Хиксу, Харроду и Солоу: генезис, применение и обобщения / А. Ф. Проневич, Г. А. Хацкевич / Белорусский экономический журнал. – № 3, 2020. – С. 87-105 (08.00.13).
11. Носко, В. П. Эконометрика. Книга первая / В. П. Носко. – Москва: Издательский дом «Дело», 2011. – С. 520–579.

DEVELOPMENT OF REGRESSION MODELS FOR ASSESSING THE INDICATORS OF ECONOMIC SECURITY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Chayuk Y.S.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Khatskevich G.A. – Doctor of Economic Sciences

Annotation. This article examines the construction of an econometric model for assessing the indicators of the economic security of the Republic of Belarus based on time series data for the period 2002–2023. Modern econometric modeling tools based on specialized software packages were applied. The GDP per capita based on purchasing power parity (PPP) is used as a universal indicator of the country's economic state, while the influencing factors are indicators reflecting the development of information and communication technologies and innovation activities. To account for both short-term and long-term relationships between variables, an error correction model (ECM) was built, confirmed by adequacy, heteroskedasticity, autocorrelation, and residual normality tests. The obtained results demonstrate the significant impact of export potential and research and development activities on the country's economic development and can be used to develop strategies for ensuring economic security.

Keywords. econometric modeling, regression analysis, error correction model, economic security, innovation activity, research and development.