

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

Влияние экономической сложности и отраслевой специализации на валовый региональный продукт регионов РФ

А.В. Кудров 

E-mail: kovlal@inbox.ru

Центральный экономико-математический институт РАН
Адрес: Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 47

Аннотация

Индекс экономической сложности определяет основу современной теории экономической сложности и отражает уровень знаний, заложенных в производственной структуре экономики. В данном исследовании изучается непосредственная связь между индексом экономической сложности и валовым региональным продуктом (ВРП) при учете других факторов производственной функции ВРП в ее обобщенном представлении, что позволяет изолировать влияние индекса экономической сложности от других явлений. Выявлен нелинейный характер связи между экономической сложностью и ВРП, причем непосредственная связь проявляется только при достаточно высоких значениях экономической сложности, превышающих определенный порог, который находится эндогенно с помощью эконометрических методов. Кроме того, в работе изучается взаимосвязь между экономической сложностью и индексами отраслевой специализации. Обнаружено наличие непосредственной связи экономической сложности с индексом добывающей промышленности и отсутствие связи с уровнем развития обрабатывающей промышленности. Получено уточнение обобщенной производственной функции ВРП, в которой пороговый эффект влияния экономической сложности проявился в качестве фактора нелинейной зависимости, описывающей эластичность труда: высокий уровень экономической сложности обеспечивает большую производительность труда. Результаты исследования зависимости ВРП от экономической сложности позволяют прийти к выводу, что повышение экономической сложности может быть эффективным способом стимулирования экономического роста и развития, но только начиная с определенного порогового уровня. Это говорит о том, что экономика должна достичь минимального уровня разнообразия и сложности в своей промышленной деятельности, прежде чем она сможет ощутить рост производительности, необходимый для существенного роста ВРП.

Ключевые слова: индекс экономической сложности, отраслевая специализация, обобщенная производственная функция, непосредственные связи, непараметрическая регрессия, нелинейная регрессия, отдача от масштаба

Цитирование: Кудров А. В. Влияние экономической сложности и отраслевой специализации на валовый региональный продукт регионов РФ // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 25–40.
DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

Введение

Сравнительно давно экономисты пришли к общему мнению, что способность страны создавать и распределять доход зависит от ее производственной структуры, что обсуждалось в таких работах, как [1–3]. В работе [4] представлено исследование конвергенции уровней производительности между штатами США и обнаружено, что более высокие уровни производительности связаны с более разнообразной и сложной производственной структурой.

Однако количественное измерение производственной структуры страны сопряжено со значительными трудностями. Были предприняты попытки использовать различные подходы, такие как индекс концентрации, который измеряет долю сельского хозяйства, промышленного производства или услуг в экономике, а также агрегированные показатели разнообразия и концентрации [5]. Другие подходы оценивают диверсификацию путем разделения секторов на связанные и несвязанные [6–8]. Однако эти методы имеют свои ограничения, включая возможность некоторого перекоса, поскольку крупные страны или регионы, как правило, более диверсифицированы. Кроме того, они не учитывают взаимосвязи между различными видами экономической деятельности, сложность и развитость производственной деятельности.

Указанные недостатки разрешаются путем рассмотрения выявленных сравнительных преимуществ и построения индекса экономической сложности [9–11]. Индекс экономической сложности позволяет получать оценки сложности структур экономики, учитывающие одновременно разнообразие и уникальность секторов, что позволяет отразить как широту, так и глубину структуры экономики.

Одним из важнейших аспектов экономической сложности является отраслевая сетевая структура, которая измеряет степень взаимосвязанности различных секторов экономики через производственные процессы. Считается, что такая взаимос-

вязь способствует передаче знаний, технологий и других ресурсов между секторами и поддерживает экономический рост. Большие значения показателя экономической сложности говорят о том, что в структуре экономики преобладают взаимосвязанные сектора. Например, отрасли с длительным производственным циклом, такие как электроника и машиностроение, требуют более высокого уровня координации и знаний и поэтому имеют высокий уровень экономической сложности. Напротив, экономические структуры, в которых преобладают сырьевые и сельскохозяйственные сектора, имеют низкие значения экономической сложности.

В работе [12] представлены расчеты индекса экономической сложности для стран и показано, как его можно использовать для прогнозирования экономического роста и определения потенциальных направлений для диверсификации и развития экономик стран.

Взаимосвязь между экономической сложностью и валовым внутренним продуктом (ВВП) представляет большой интерес для экономистов, поскольку ВВП является общепринятым показателем регионального производства и экономического развития.

Авторы работы [11] показали, что страны с более сложной производственной структурой, как правило, имеют более высокие уровни экономического роста и более высокий ВВП на душу населения, которые, в свою очередь, связаны с более низким уровнем бедности и лучшим социальным благосостоянием, см. [13]. Отсюда делается вывод, что политика развития должна быть направлена на создание условий, которые будут стимулировать рост экономической сложности (более подробное об- суждение, см. [10]).

В последние годы в статистических исследованиях индекс экономической сложности используется в качестве объясняющего фактора для экономического роста, уровня знаний, человеческого капитала, неравенства и других социально-экономических показателей [12, 14, 15]. Однако связь между экономи-

ческой сложностью и социально-экономическими показателями не всегда однозначна, и существуют другие факторы, которые могут влиять на эту связь. Как будет показано в этой работе часто предположение или выводы о наличии непосредственной связи ВРП с экономической сложностью является ошибочным, поскольку, как правило, не рассматриваются другие основные показатели экономики и науки.

В работе [16] было получено обобщенная производственная функция ВРП, в которой региональный выпуск зависит от числа занятых (L), стоимости основных фондов (K) со своими коэффициентами эластичности, которые задаются отраслевой структурой ВРП, и числом исследователей (P) (выделяется как дополнительный фактор производства с постоянным коэффициентом эластичности). Эти факторы производственной функции будут рассмотрены в качестве основных характеристик экономики.

Цель данной работы – проверить две гипотезы, используя данные по регионам Российской Федерации. Во-первых, мы изучим, существует ли непосредственная связь между индексом экономической сложности и ВРП. Во-вторых, мы изучим, существует ли непосредственная связь между сложностью экономики и факторами обобщенной производственной функции. Для этого будет использована методология нахождения непосредственных связей и тестирования семейства гипотез [16, 17].

1. Данные

Рассмотрим ВРП за 2019 год и основные факторы обобщенной производственной функции ВРП из работы [16]:

- ◆ валовый региональный продукт за 2019 год [18];
- ◆ стоимость основных фондов на конец 2019 года [18];
- ◆ среднегодовая численность занятых за 2019 год [18];
- ◆ индексы добывающей S_1 и обрабатывающей S_2 промышленности (см. ниже);
- ◆ численность исследователей за 2019 год [18].

Поясним подробнее про индексы добывающей (S_1) и обрабатывающей (S_2) промышленности, характеризующие отраслевые особенности региона. Эти индексы были построены автором по данным отраслевой структуры ВРП с использованием компонентного анализа с вращением и отражают отраслевую специализацию рассмотренных регионов

(рис. 1). Данные отраслевой структуры ВРП включали основные 6 отраслей, которые определяют характер экономики регионов РФ [18]:

- ◆ сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство;
- ◆ добыча полезных ископаемых;
- ◆ обрабатывающие производства;
- ◆ торговля оптовая и розничная;
- ◆ деятельность по операциям с недвижимым имуществом;
- ◆ государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение.

Далее, эти показатели были выражены через два фактора методом главных компонент с вращением (рис. 1), на которые приходится более 80% объясненной дисперсии по данным на 2019 г. Для других близких лет наблюдаются весьма похожие результаты, что свидетельствует о весьма медленном изменении структуры регионального ВРП.

Вместе с этим были рассмотрены данные о налоговых поступлениях по секторам экономики по 82 секторам экономики субъектов РФ [19], которые отражают объемы производства каждого сектора экономики для экспорта и для внутреннего потребления. По этим данным на 2019–2020 гг. был построен индекс экономической сложности, см. [20]. На рис. 2 показаны полученные оценки индекса экономической сложности. Отметим, что индекс экономической сложности, по сути, эквивалентен обобщенному собственному вектору матрицы «регион–регион», элементы которой характеризуют вложенность структур экономик.

Область значений экономической сложности можно условно разделить на диапазоны, внутри которых локально точки хорошо аппроксимируются линейными зависимостями от рангов:

- ◆ **Диапазон 1:** регионы с преобладанием в структуре экономики уникальных секторов. Как правило, эти регионы характеризуются специализацией в добывающей промышленности. Для них среднее значение индекса добывающей промышленности (+13,64). Достаточно высокое среднее значение индекса обрабатывающей промышленности (+11,05) свидетельствует о наличии регионов со структурой смешанного типа, где также достаточно представлены сектора обрабатывающей промышленности.
- ◆ **Диапазон 2:** регионы со слабо диверсифицированной структурой сильных секторов и неуникаль-

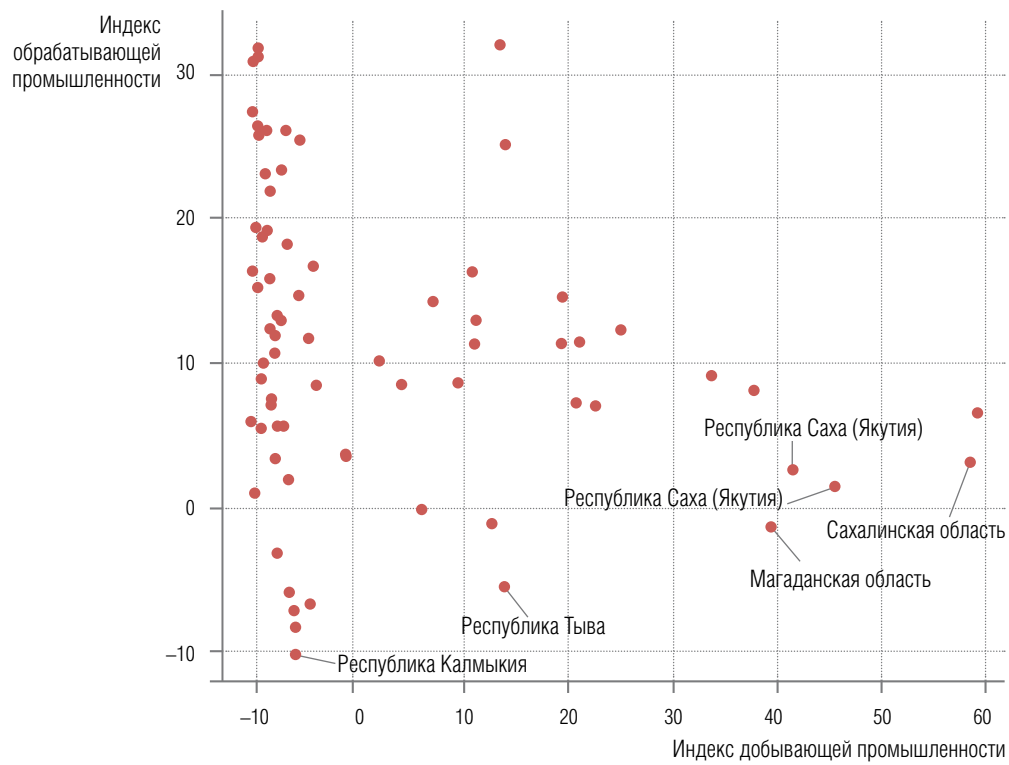


Рис. 1. Распределение регионов России в пространстве факторов отраслевой ориентации (упорядоченные по возрастанию; по данным 2019 г.).

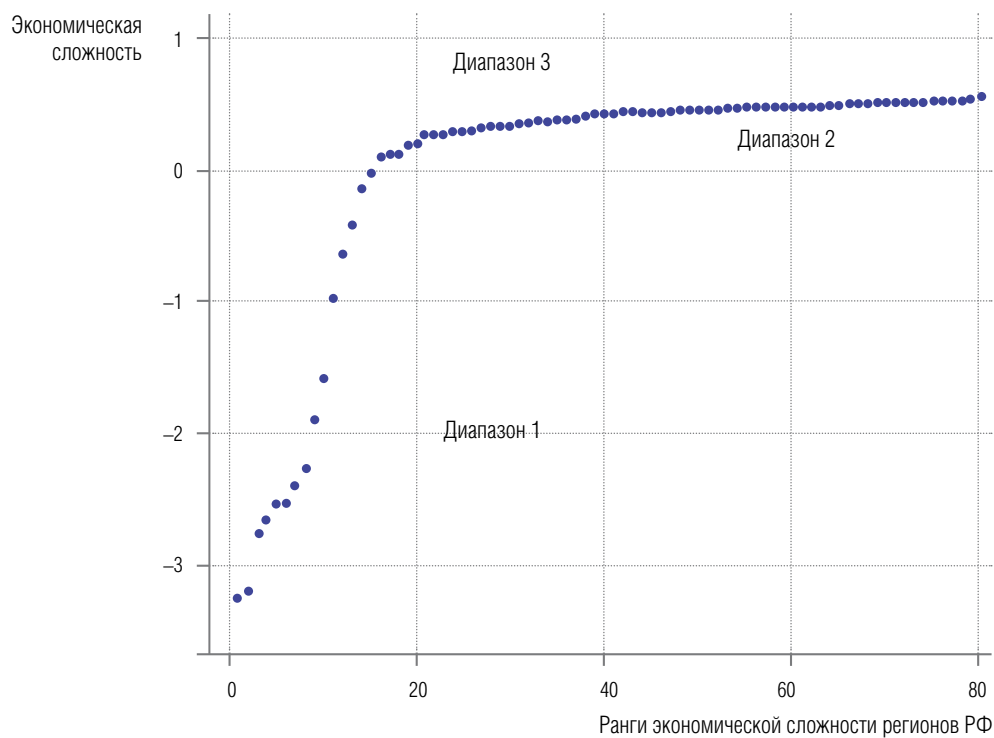


Рис. 2. Оценки экономической сложности по регионам РФ (упорядоченные по возрастанию; по данным 2019 г.).

ными секторами. В число этих регионов входят регионы с формирующейся экономикой. Среднее значение индекса добывающей промышленности (+7,16), среднее значение индекса обрабатывающей промышленности (+7,45).

- ◆ **Диапазон 3:** регионы с сильно диверсифицированными структурами сильных секторов и наличием длинных цепочек добавленной стоимости. Сюда входят регионы, характеризующиеся наличием длинных цепочек добавленной стоимости и специализацией в обрабатывающей промышленности. Среднее значение индекса добывающей промышленности равно (-3,87) указывает на отсутствие добычи полезных ископаемых в большинстве этих регионов. Среднее значение индекса обрабатывающей промышленности равно (+17,68).

Отметим, что наименьший разброс значений экономической сложности наблюдается для точек из диапазона 1, а разброс точек из диапазона 3 – наибольший. Минимальное среднее значение индекса добывающей промышленности имеется для регионов с экономической сложностью из диапазона 1, а максимальное для диапазона 3.

2. Методология исследования

Предлагаемая методология имеет своей целью получение аналитического выражения, описывающего влияние экономической сложности на валовой региональный продукт (ВРП). Методология состоит из нескольких шагов:

1. Определение объясняющих переменных, непосредственно связанных с ВРП. На первом этапе необходимо определить переменные, которые непосредственно связаны с ВРП (далее обозначим Y_i – ВРП i -го региона). Это делается при помощи техники так называемого «причинного анализа» или анализа структуры *непосредственных связей* [16]. Поясним это понятие. Если в совокупности случайных переменных (включающей в себя как результирующие, так и объясняющие переменные) $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ условное распределение величины Z_i от всех остальных определяется *только их частью* Z_j, Z_k, \dots, Z_l (не вошедшие в условие могут принимать любые значения). Обозначим строчными буквами z_1, \dots, z_n реализованные значения соответствующих случайных переменных Z_1, Z_2, \dots, Z_n . Тогда определение *непосредственных связей* можно записать в виде:

$$P(z_i | z_1, \dots, z_n) = P(z_i | z_j, z_k, \dots, z_l) \quad (1)$$

для всех z_1, \dots, z_n ,

и переменные Z_j, Z_k, \dots, Z_l называются *непосредственно связанными* с переменной Z_i . В непрерывном случае частные корреляции Z_i с непосредственно связанными (и только с ними!) не равны нулю. А именно, если Z_i и Z_j являются непосредственно связанными, то отличной от нуля будет:

$$\begin{aligned} \text{corr}(Z_i, Z_j | Z_{-(i,j)}) &= \\ &= \text{corr}(Z_i - Pr_{Z_i}(Z_{-(i,j)}), Z_j - Pr_{Z_j}(Z_{-(i,j)}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $Z_{-(i,j)}$ – набор переменных за исключением Z_i и Z_j ; $Pr_{Z_i}(Z_{-(i,j)})$ и $Pr_{Z_j}(Z_{-(i,j)})$ – проекция Z_i и Z_j на линейное подпространство $sp(Z_{-(i,j)})$.

2. Идентификация формы зависимости ВРП и экономической сложности: монотонная или немонотонная? Для выявления немонотонной взаимосвязи между ВРП и экономической сложностью используется оценка непараметрической ядерной регрессии Надарая–Ватсона $g_\tau(x)$ [21]:

$$g_\tau(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x) \log(Y_i)}{\sum_{i=1}^N w_i(x)}, \quad (3)$$

где $w_i(x) = k\left(\frac{x - X_i}{\tau}\right)$, $k(y) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}}$;

$\log(Y_i)$ – логарифм ВРП региона i ;

X_i – ранги экономической сложности региона i ;

$k(y)$ – ядро непараметрической регрессии (3) с параметром τ , τ – ширина окна в непараметрической ядерной регрессии (3).

Отметим, что ширина окна τ оценивалась при помощи так называемой перекрестной валидации с оставлением одной точки (*leave-one-out estimate*), см. подробнее [22]:

$$\tau_{opt} = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N \left(\log(Y_i) - g_{\tau,(i)}(X_i) \right)^2, \quad (4)$$

где обозначение (i) означает, что точка i не учитывается при вычислении непараметрической оценки в точке X_i . Использование перекрестной валидации с оставлением одной точки особенно полезно, когда размер данных небольшой, поскольку позволяет обучить модель почти на всем наборе данных. Однако для больших данных этот подход перекрестной валидации может оказаться вычислительно затратным, поскольку модель приходится переобучать для каждой отдельной точки данных.

3. Построение нелинейной регрессионной зависимости ВРП от непосредственно связанных объясняющих переменных. После того как выявлены переменные, которые непосредственно связаны с ВРП (обозначим через Y_i – ВРП i -го региона, $i = 1, \dots, N$), и определена форма немонотонной зависимости ВРП и экономической сложности, строится нелинейная регрессионная зависимость от этих переменных, имеющая вид:

$$Y_i = f(x_i, \theta^*) + \varepsilon_i, i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где $f: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ нелинейная функция объясняющих и непосредственно связанных с Y_i объясняющих переменных $x_i \in \mathbb{R}^k$;

$\theta^* \in \mathbb{R}^p$ – вектор истинных значений неизвестных параметров;

(ε_i) предполагаются независимыми одинаково распределенными случайными величинами (необязательно нормально распределенными) с $E(\varepsilon_i) = 0$ и $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$.

В предположении, что функция $f(\cdot)$ известна, вектор параметров θ модели (5) оценивается как решение следующей задачи:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(x_i, \theta))^2. \quad (6)$$

Нахождение решения этой задачи делается численными методами с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта [23, 24].

Согласно результатам, представленным в [23, 24], при достаточно больших n и соответствующих предположениях о регулярности (таких как два-

жды непрерывно дифференцируемости $f(x_i, \theta)$ относительно θ), МНК-оценка $\hat{\theta}$ имеет асимптотически нормальное распределение:

$$\hat{\theta} \sim N_p \left(\theta^*, \sigma^2 \left[(F(\theta^*))^T F(\theta^*) \right]^{-1} \right), \quad (7)$$

где $F(\theta^*) = \left[\frac{\partial f(x_i, \theta)}{\partial \theta_j} \Big|_{\theta=\theta^*} \right]_{i,j} \in \mathbb{R}^{N \times p}$.

Таким образом, данная методология объединяет несколько статистических методов, включая причинно-следственный анализ, непараметрическое оценивание и нелинейную регрессию для установления взаимосвязи между экономической сложностью и ВРП.

3. Результаты исследований

Проанализируем взаимные связи между экономической сложностью и указанными выше показателями науки, экономики в регионах РФ. Для этого по данным за 2019 год была оценена матрица частных корреляций и произведено последовательное тестирование гипотез об отсутствии непосредственных связей каждой переменной с экономической сложностью (табл. 1).

В таблице 1 (правая часть) представлены результаты проверки семейства гипотез о равенстве нулю частных корреляций, более детальное описание процедуры тестирования рассмотренных гипотез см. в [16]. Единицами отмечены случаи отсутствия непосредственной связи экономической сложности с соответствующей переменной.

Таблица 1.

Статистические оценки частных корреляций с экономической сложностью (для исходных переменных и их рангов) за 2019 г. Результаты проверки семейства гипотез на равенство нулю частных корреляций.

	Частная корреляция с экономической сложностью	Н0: частная корреляция с экономической сложностью равна нулю	Частная корреляция с экономической сложностью для рангов	Н0: частная корреляция с экономической сложностью для рангов равна нулю
Стоимость основных фондов	0,16	1	0,20	1
Среднегодовая численность занятых	-0,30	0	-0,06	1
ВРП	-0,14	1	-0,24	0
Численность исследователей	0,03	1	-0,05	1
Индекс добывающей промышленности	-0,53	0	-0,61	0
Индекс обрабатывающей промышленности	-0,12	1	-0,01	1

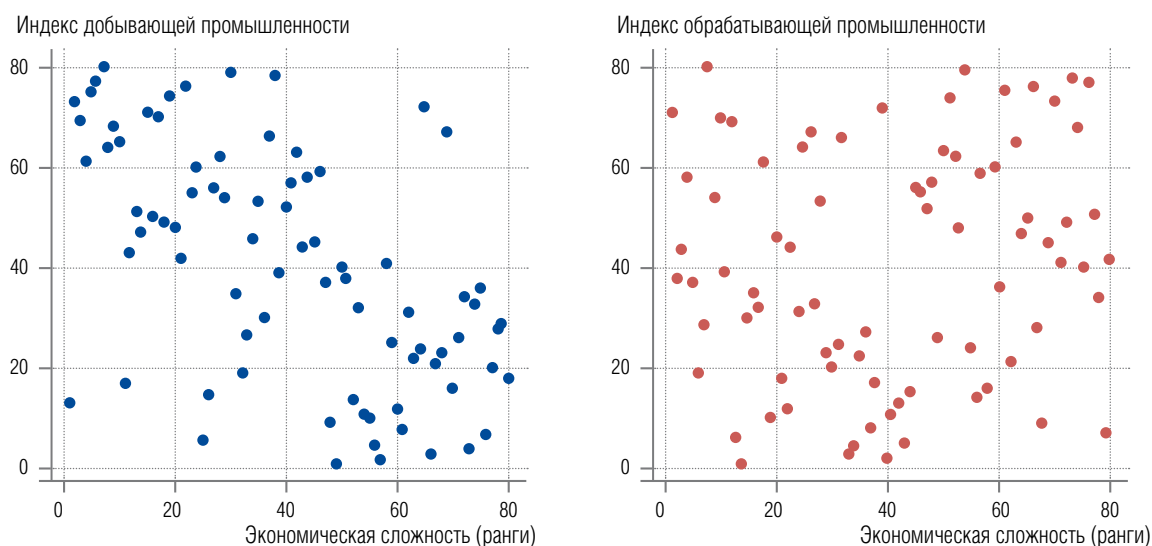


Рис. 3. Справа: индекс добывающей промышленности (ранги) и экономическая сложность (ранги). Слева: индекс обрабатывающей промышленности (ранги) и экономическая сложность (ранги).

Как видно из *таблицы 1*, экономическая сложность не связана с индексом обрабатывающей промышленности, но связана с индексом добывающей промышленности. На *рис. 3* представлено визуальное подтверждение этому.

Среди всех рассмотренных переменных экономическая сложность имеет статистически значимую непосредственную связь с индексом добывающей промышленности. Наличие такой связи указывает на то, что сценарий перехода от экономики, основанной на добывающей промышленности (например, горнодобывающей или нефтедобывающей), к более диверсифицированной (в частности, ориентированной на длинные цепочки добавленной стоимости) ассоциируется с повышением уровня сложности экономики.

Отсутствие связи между индексом экономической сложности и индексом обрабатывающей промышленности, может означать, что простого присутствия обрабатывающей промышленности в экономике недостаточно для повышения ее сложности. Это может быть так, если производство сосредоточено в нескольких отраслях с низким уровнем сложности или если другие сектора экономики остаются неразвитыми.

Как показано в *таблице 1*, частная корреляция для ВРП и индекса экономической сложности является незначимой, тогда как в случае частной корреляции для рангов имеется статистически значимая связь для этих переменных (гипотеза принимается

на уровне 5%). Это указывает на наличие нелинейной связи между индексом экономической сложности и ВРП.

Рассмотрим подробнее форму зависимости логарифма ВРП от рангов экономической сложности (*рис. 4*).

Отметим, что U-образная зависимость на *рис. 4*, полученная с использованием непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона, говорит о том, что между сложностью экономики и ВРП не может быть простой линейной зависимости.

U-образная зависимость между экономической сложностью и ВРП подразумевает, что как очень низкий, так и очень высокий уровень экономической сложности соответствует высокому ВРП, в то время как средний уровень экономической сложности соответствует более низким значениям ВРП. Таким образом, можно выделить следующие типы региональных экономик:

1. Низкая экономическая сложность, высокий ВРП: региональные экономики, как правило, богатые природными ресурсами, и их ВРП в значительной степени сосредоточен в добывающих отраслях, таких как нефть, газ или горнодобывающая промышленность. Несмотря на низкую сложность экономики (поскольку они в основном сосредоточены на одном или нескольких секторах), эти регионы могут иметь высокий ВРП благодаря высокой рыночной стоимости своих ресурсов и интенсифицированной добыче полезных ископаемых.

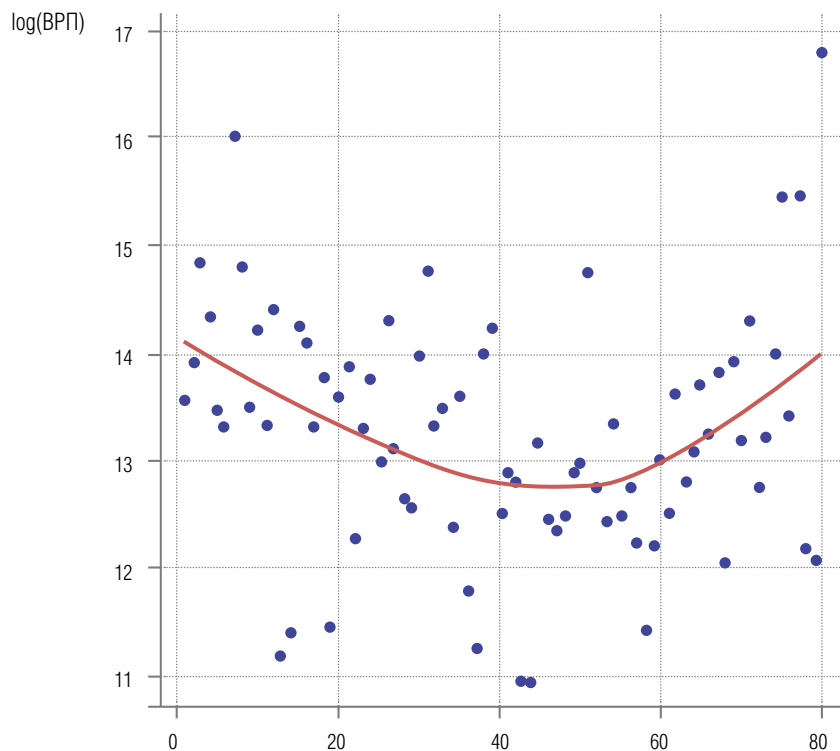


Рис. 4. ВРП и ранги экономической сложности за 2019 год; непараметрическая регрессия Надарайя–Ватсона (3).

2. Высокая сложность, высокий ВРП: региональные экономики с высокой сложностью экономики, как правило, имеют широкий спектр развитых и взаимосвязанных отраслей, включающие высокотехнологичные производства. Эти регионы обычно характеризуются высоким уровнем индустриализации, инвестициями в человеческий капитал и технологическими инновациями.

3. Средний уровень сложности, более низкий ВРП: региональные экономики, которые находятся в процессе перехода к более диверсифицированной и сложной экономике. Отсутствует развитый потенциал для эффективного производства более сложных товаров и услуг.

Таким образом, согласно рис. 4, можно выделить два возможных пути к более высокому объему ВРП: 1) через добычу природных ресурсов или 2) через развитие более сложной индустриальной экономики. Каждый путь имеет свои преимущества и проблемы. Например, богатые ресурсами регионы могут быстро достичь высокого ВРП, но при этом они могут столкнуться с нестабильностью из-за колебаний цен на сырьевые товары и могут испытывать трудности с диверсификацией своей экономики.

В силу немонотонности соответствия между логарифмом ВРП и экономической сложностью, возьмем в качестве порога для экономической сложности аргумент x_{opt} , при котором достигается минимум построенной непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона (3) $g_{x_{opt}}(x)$ (рис. 4):

$$x_{opt} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} g_{x_{opt}}(x) = 46.$$

Ранг x_{opt} соответствует значению экономической сложности равному 0,45.

Оценим пороговое влияние экономической сложности на ВРП:

$$\operatorname{cor}(\text{ВРП}, ECI | ECI \geq 0,45, X_{-(\text{ВРП}, ECI)}) = 0,79,$$

$$\operatorname{cor}(\text{ВРП}, ECI | ECI < 0,45, X_{-(\text{ВРП}, ECI)}) = -0,18,$$

где $X_{-(\text{ВРП}, ECI)}$ — все рассматриваемые показатели науки и экономики за исключением ВРП и ECI.

Таким образом, только при значениях экономической сложности, превышающих 0,45, имеется непосредственная связь ВРП и индекса экономической сложности.

На основании выявленной пороговой непосредственной связи экономической сложности и ВРП было обобщено представление расширенной производственной функции для ВРП:

$$Y = c \cdot K^{\beta_1(S_1, S_2)} L^{\beta_2(S_1, S_2, T)} P^\gamma + \epsilon, \tag{8}$$

где

$$\beta_1(S_1, S_2) = \frac{\mu_1 e^{(\mu_2 \cdot S_1 + \mu_3 \cdot S_2)}}{1 + \mu_1 e^{(\mu_2 \cdot S_1 + \mu_3 \cdot S_2)}}, \beta_2(S_1, S_2, T) = \frac{\lambda_1 e^{(\lambda_2 \cdot S_1 + \lambda_3 \cdot S_2 + \lambda_4 \cdot T^2)}}{1 + \lambda_1 e^{(\lambda_2 \cdot S_1 + \lambda_3 \cdot S_2 + \lambda_4 \cdot T^2)}};$$

$$T = \begin{cases} ECI, & \text{если } ECI \geq 0,45 \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$c, \gamma, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ – константы;

Y – валовый региональный продукт в 2019 году

K – стоимость основных фондов на конец 2019 года

L – среднегодовая численность занятых за 2019 год

P – численность исследователей за 2019 год

ECI – индекс экономической сложности, рассчитанный по данным за 2019 год;

S_1 и S_2 – отраслевые индексы, рассчитанные за 2019 год;

ϵ – ошибки модели (8).

Заметим, что найденное выражение для ВРП оценено с большей точностью, а именно $R^2 = 0,982$, что больше чем в работе [16].

Эндогенность в модели (8) возникает, когда ошибка ϵ статистически зависима от одной или нескольких объясняющих переменных среди K, L, P, S_1, S_2, T . А именно:

$$E(\epsilon | K, L, P, S_1, S_2, T) \neq 0.$$

Как известно, наличие эндогенности приводит к смещенности и несостоятельности МНК-оценок параметров модели, что приводит к неверным выводам о статистической значимости связей. Чтобы проверить гипотезу об отсутствии эндогенности требуется проверить гипотезу о независимости каждой из объясняющих переменных и ошибок в модели (8). Для проверки независимости воспользуемся критерием независимости Гильберта–Шмидта [25]. В отличие от теста Хаусмана независимости объясняющих переменных и ошибок модели, которая предполагается линейной [26], критерий независимости Гильберта–Шмидта допускает наличие нелинейной зависимости. Высокое значение критерия независимости Гильберта–Шмидта для пары переменных указывает на их зависимость, а низкое значение отвечает независимости. В предположении, что нулевая гипотеза состоит в независимости рассматриваемой пары переменных, в таблице 3 представлены результаты проверки.

Как можно видеть из результатов таблицы 3, не отвергается гипотеза о том, что ошибки в модели (8) являются независимыми от объясняющих переменных.

Для того, чтобы убедиться, что наблюдаемое отсутствие связи ошибок и объясняющих переменных не обусловлена искажающими переменными сделаем проверку на условную независимость. Для этого также можно воспользоваться критерием независимости Гильберта–Шмидта, см. таблицу 4.

Таблица 2.

Значения оценок параметров модели (1) и их статистическая значимость

	Оценка	Ст. ошибка	t-значение	p-значение	
C	6,77	0,42	4,53	0,00	***
μ_1	1,79	0,21	2,72	0,01	**
μ_2 (индекс добывающей промышленности; фонды)	0,01	0,00	3,53	0,00	***
μ_3 (индекс обрабатывающей промышленности; фонды)	-0,02	0,01	-3,68	0,00	***
λ_1	0,33	0,26	-4,35	0,00	***
λ_2 (индекс добывающей промышленности; занятые)	-0,01	0,01	-1,96	0,05	*
λ_3 (индекс обрабатывающей промышленности; занятые)	0,05	0,01	3,83	0,00	***
λ_4 (экономическая сложность)	3,34	1,16	2,89	0,01	**
γ (исследователи)	0,05	0,02	2,81	0,01	**

Обозначения: *** – p-значение на уровне менее 0,001, ** – p-значение на уровне менее 0,01, * – p-значение на уровне менее 0,05.

Таблица 3.

Тестирование гипотезы о независимости ошибок модели (8) и ее объясняющих переменных

Пары переменных	Критерий независимости Гильберта-Шмидта	<i>p</i> -значение	Наличие независимости
ϵ, T	0,0000033	0,13	независимы
ϵ, K	0,0000364	0,8	независимы
ϵ, L	0,0000366	0,79	независимы
ϵ, P	0,0000257	0,97	независимы
ϵ, S_1	0,000193	0,27	независимы
ϵ, S_2	0,000237	0,23	независимы

Таблица 4.

Тестирование гипотез об условной независимости ошибок модели (8) и ее объясняющих переменных

Пары переменных условие	Критерий независимости Гильберта-Шмидта	<i>p</i> -значение	Наличие независимости
$(\epsilon, T T, L, P, S_1, S_2)$	0,00000154	0,11	независимы
$(\epsilon, K T, L, P, S_1, S_2)$	0,0000503	0,98	независимы
$(\epsilon, L T, K, P, S_1, S_2)$	0,000258	0,45	независимы
$(\epsilon, P T, K, L, S_1, S_2)$	0,000149	0,89	независимы
$(\epsilon, S_1 T, K, L, P, S_2)$	0,000368	0,77	независимы
$(\epsilon, S_2 T, K, L, P, S_1)$	0,000657	0,18	независимы

Согласно результатам, представленным в *таблице 4*, подтверждается также гипотеза о наличии условной независимости ошибок и объясняющих переменных в модели (8).

Наличие статистически значимого положительного параметра λ_4 при усеченной экономической сложности говорит о возможности эффекта «перелива» инноваций. Регионы с более сложной производственной структурой, как правило, имеют более широкую диверсификацию, что создает возможности для межотраслевого распространения знаний и технологий, что в свою очередь может привести к увеличению инноваций и росту производительности. Кроме того, регион, производящий разнообразную продукцию и имеющий взаимосвязанные производственные процессы, имеет больше возможностей для использования эффекта масштаба.

Рисунок 5 иллюстрирует, что возрастающая отдача от масштаба характерна для регионов с высокой эластичностью труда и низкой эластичностью капитала.

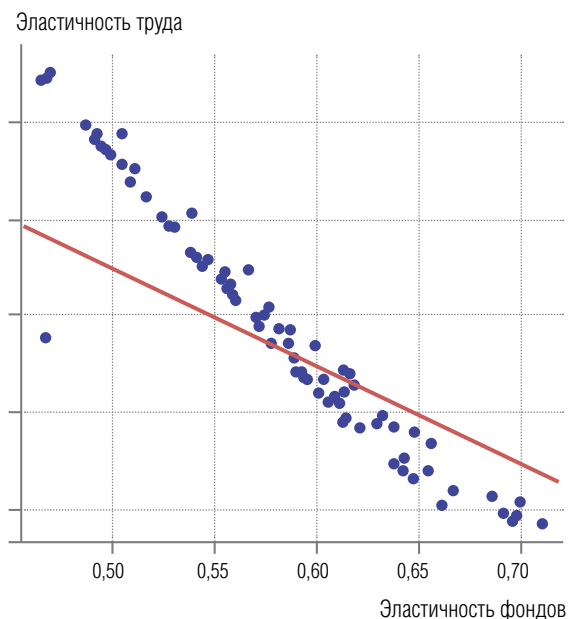


Рис. 5. Для каждого региона согласно модели (1):
 $\beta_1(S_1, S_2)$ – эластичность основных фондов, ось абсцисс;
 $\beta_2(S_1, S_2, T_1)$ – эластичность труда, ось ординат.
 Прямая: $x + y + \gamma = 1$.

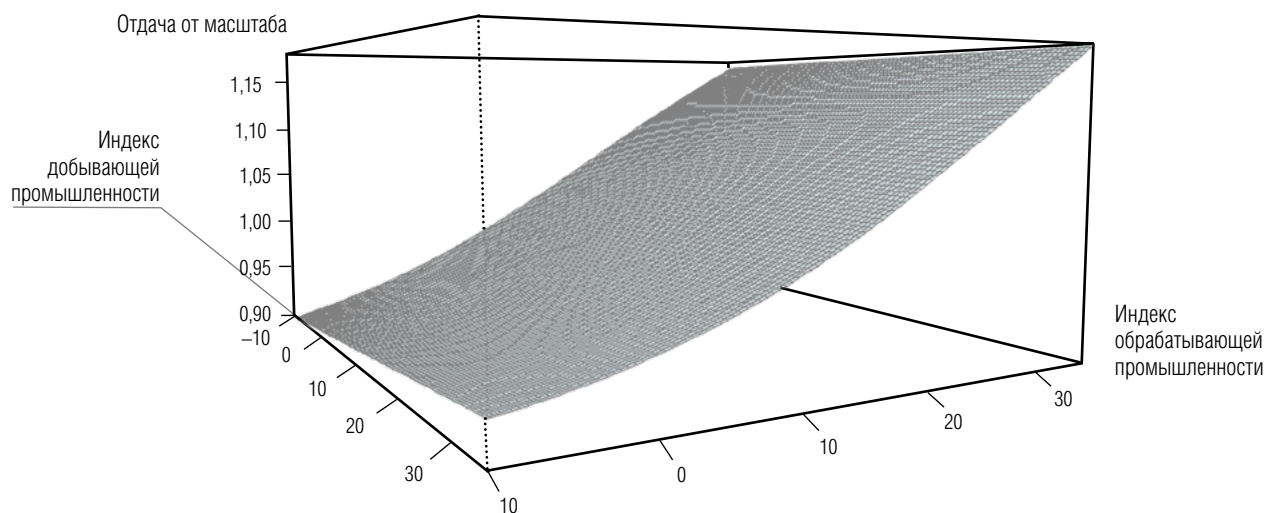


Рис. 6. Ось абсцисс – индекс добывающей промышленности; ось ординат – индекс обрабатывающей промышленности; ось аппликат – отдача от масштаба, рассчитываемая как $\beta_1(S_1, S_2) + \beta_2(S_1, S_2, T_1) + \gamma$.

Как видно из рис. 5, рост эластичности труда сопровождается снижением эластичности капитала и наоборот. Это свидетельствует о сдвиге в производственной функции, обусловленном отраслевыми различиями региональных экономик.

Из рис. 6 видно, что наличие убывающей отдачи от масштаба характерно для регионов с высокой концентрацией добывающих отраслей в структуре региональной экономики. Убывающая отдача от

масштаба означает, что пропорциональное увеличение труда и капитала приводит к менее чем пропорциональному увеличению выпуска. Это может быть связано с тем, что добывающие отрасли (например, добыча полезных ископаемых, нефти и газа) часто являются капиталоемкими и могут сталкиваться с такими проблемами, как истощение ресурсов, экологические нормы или высокие эксплуатационные расходы.

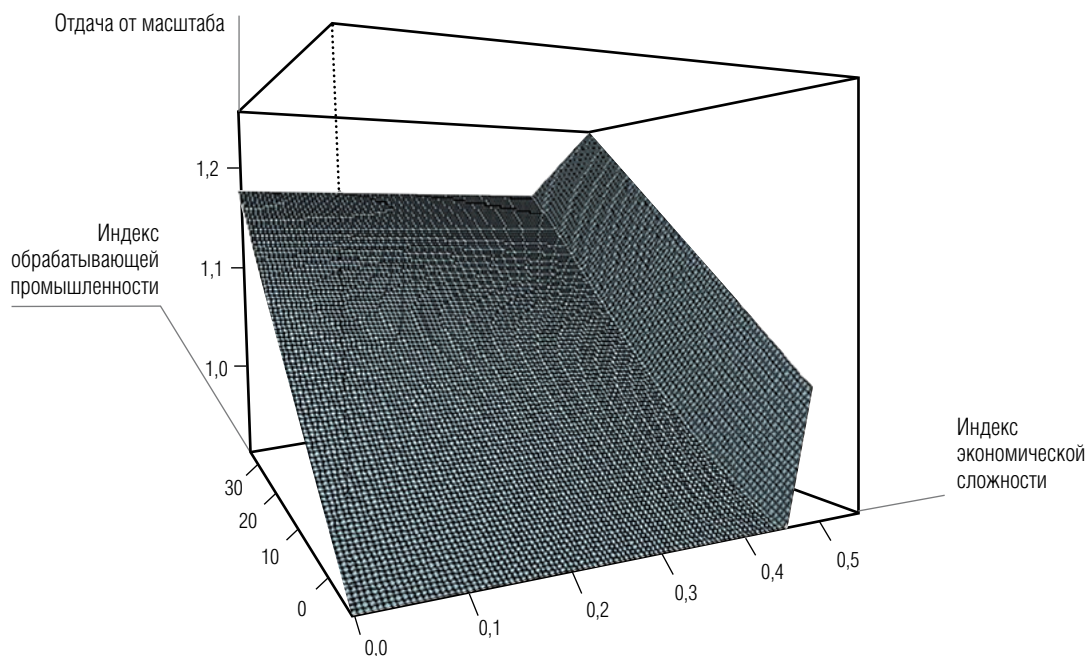


Рис. 7. Ось абсцисс – индекс экономической сложности; ось ординат – индекс обрабатывающей промышленности; ось аппликат – отдача от масштаба, рассчитываемая как $\beta_1(S_1, S_2) + \beta_2(S_1, S_2, T_1) + \gamma$.

На *рис. 7* показано, что возрастающая отдача от масштаба характерна для регионов с большой концентрацией обрабатывающей промышленности и большим значением экономической сложности. Достаточно большие значения экономической сложности, превышающие порог 0,45, отвечают большим значениям отдачи от масштаба.

Так как индекс экономической сложности характеризует концентрацию смежных секторов в структуре экономики, то по мере того, как экономика становится более сложной, сетевое или смежное взаимодействие способствует обмену передовым опытом и сотрудничеству в области инноваций, а, следовательно, способствует повышению производительности. В сложной экономике, характеризующейся сложными межотраслевыми связями и развитым производством, богатство разнообразных знаний и навыков, как правило, велико. Смежность секторов позволяет передавать эти знания между секторами, способствуя повышению общей производительности труда. При высоком уровне отраслевой смежности инновации и технологические достижения легче распространяются по смежным секторам.

Формирование смежных секторов стимулирует совместное развитие, когда сектора растут не изолированно, а за счет совместного развития технологий, навыков и знаний. Такой взаимосвязанный рост может еще больше повысить производительность труда за счет синергии между различными секторами.

Таким образом, регионы с более разнообразными и сложными производственными структурами со специализацией в обрабатывающей промышленности имеют больше возможностей для получения выгоды от эффекта масштаба и реагирования на экономические изменения. Как уже отмечалось ранее, регионы с более сложной экономической структурой, как правило, имеют более диверсифицированную экономику, что делает их более приспособленными к нестабильной экономической конъюнктуре.

Заключение

Наиболее важные результаты проведенного эконометрического исследования влияния экономической сложности на ВРП субъектов РФ, выполненного путем последовательного использования трех статистических методов (частнокорреляционного анализа выявления непосредственных связей между переменными, метода Надарайя–Ватсона оценки непараметрической регрессии и метода наименьших квадратов для не-

линейных производственных функций) на основе статистических данных 2019 года, состоят в следующем:

- ◆ Отсутствует непосредственная статистическая связь между индексом обрабатывающей промышленности и экономической сложностью для регионов РФ. Это означает, что появление новых обрабатывающих секторов или расширение ранее существующих необязательно сопровождается повышением экономической сложности.
- ◆ Индекс добывающей промышленности имеет непосредственную связь с индексом экономической сложности. Рост индекса добывающей промышленности соответствует снижению индекса экономической сложности.
- ◆ Статистическое оценивание непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона показало наличие нелинейной зависимости между ВРП и индексом экономической сложности.
- ◆ Проранжировав регионы по уровню экономической сложности и исключив влияние других переменных выборки, найден такой номер ранга и соответствующий ему уровень экономической сложности, выше которого существует непосредственная связь ВРП и экономической сложности, а ниже которого она отсутствует.
- ◆ Статистические оценки параметров рассмотренной обобщенной производственной функции показывают, что эластичность по капиталу статистически значимо зависит от индексов отраслевой специализации, а эластичность по труду зависит как от индексов отраслевой специализации, так и экономической сложности. Для значений экономической сложности, превышающей определенный порог, высокая экономическая сложность соответствует более высокой эластичности труда. Это свидетельствует о том, что регионы с более сложной, разнообразной и взаимосвязанной производственной структурой обладают более высокой производительностью и, следовательно, имеют больше возможностей для эффективного использования своих трудовых ресурсов.
- ◆ Возрастающая отдача от масштаба проявляется только в регионах, где преобладают отрасли обрабатывающей промышленности и имеется достаточно высокий уровень экономической сложности. Региональные экономики с высокой концентрацией добывающих отраслей характеризуются снижением отдачи от масштаба, что потенциально ограничивает их рост.

◆ Обрабатывающая промышленность может предоставить больше возможностей для повышения производительности и увеличения добавленной стоимости по сравнению с добывающими отраслями.

В целом, результаты исследования взаимосвязи между ВВП и экономической сложностью подчеркивают важность учета экономической сложности в качестве объясняющей переменной производственной функции регионального ВВП в обобщенном ее виде. Стимулирование роста экономической сложности может быть эффективным способом содействия экономическому росту и повышению производительности, но этот эффект проявляется только при достаточно высоком уровне экономической сложности. Увеличивая разнообразие и экономическую сложность своих производственных структур, регионы могут повысить производительность, конкурентоспособность и экономическую стабильность, что приведет к более высоким уровням ВВП и устойчивости экономического роста.

Следует также подчеркнуть важность состава секторов экономики и баланса между трудом и капиталом в формировании производства и роста. Регионы, сосредоточенные на отраслях с высокой эластичностью по труду, характеризуются возрастающей отдачей от масштаба и, следовательно, потенциально более высокими темпами роста экономики. И наоборот, регионы с высокой концентрацией добывающих отраслей могут стол-

кнуться со снижением отдачи от масштаба, что потенциально ограничивает их рост. Это подчеркивает важность политики, направленной на повышение производительности труда и диверсификацию от добывающих отраслей для устойчивого экономического роста.

Представленная в данной работе методология количественной оценки влияния сложности экономики на валовой региональный продукт (ВРП) может быть полезной в процессе принятия решений о размещении новых производственных мощностей, распределительных центров или филиалов предприятий. Понимание влияния сложности экономики на ВРП может помочь выявить экономически устойчивые и достаточно диверсифицированные регионы с более благоприятными условиями для бизнеса. Однако, регионы со сложной структурой экономики характеризуются также более высоким потенциальным уровнем конкуренции.

Более высокий ВРП обычно коррелирует с более высокой покупательной способностью потребителей. Поэтому представленные результаты могут помочь предприятиям выявить потенциально прибыльные региональные рынки для сбыта своей продукции или услуг. Однако, важно отметить, что при всей своей полезности данная методика является одним из инструментов и должна использоваться в сочетании с другими источниками данных и маркетинговыми исследованиями для принятия комплексных решений. ■

Литература

1. Hirschman A.O. The strategy of economic development. New Haven: Yale Univ. Press, 1958. Vol. 10.
2. Rosenstein-Rodan P.N. Problems of industrialization of eastern and southeastern Europe // The Economic Journal. 1943. Vol. 53(210/211). P. 202–211.
3. Teece D., Rumelt R., Dosi G., Winter S. Understanding corporate coherence: Theory and evidence // Journal of Economic Behavior & Organization. 1994. Vol. 23(1). P. 1–30.
4. Bernard A.B., Jones C.I. Productivity and convergence among U.S. States. National Bureau of Economic Research, 1996.
5. Imbs J., Wacziarg R. Stages of diversification // The American Economic Review. 2003. Vol. 93(1). P. 63–86.
6. Boschma R., Iammarino S. Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy // Economic Geography. 2009. Vol. 85(3). P. 289–311.
7. Frenken K., Oort F.V., Verburg T. Related variety, unrelated variety and regional economic growth // Regional Studies. 2007. Vol. 41(5). P. 685–697.
8. Frenken K., Saviotti P. Export variety and the economic performance of countries // Journal of Evolutionary Economics. 2008. Vol. 18(2). P. 201–218.
9. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Chung S., Jimenez J., Simoes A. The building blocks of economic complexity // PLOS One. 2007. Vol. 2(1). e268.

10. Hausmann R, Hidalgo C.A. Atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. MIT Press, 2017.
11. Hidalgo C.A., Hausmann R. The building blocks of economic complexity // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009. Vol. 367(1897). P. 1817–1825.
12. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Simoes A., Yildirim M.A., Hwang J. The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. MIT Press, 2014.
13. Ravallion M. Competing concepts of inequality in the globalization debate // *Brookings Trade Forum Globalization, Poverty, and Inequality*. 2004. P. 1–38. [Электронный ресурс]: <https://www.jstor.org/stable/25063189> (дата обращения 14.02.2023).
14. Hartmann D., Guevara M.R., Jara-Figueroa C., Aristarán M., Hidalgo C. Linking economic complexity, institutions, and income inequality // *World Development*. 2017. Vol. 93. P. 75–93.
15. Hidalgo C.A., Klinger B., Barabási A.L., Hausmann R. The product space conditions the development of nations // *Science*. 2007. Vol. 317(5837). P. 482–487.
16. Гаврилец Ю.Н., Кудров А.В., Тараканова И.В. Анализ внутренней структуры экономического потенциала роста // *Вестник ЦЭМИ РАН*. 2018. Т. 1. № 1.
17. Гаврилец Ю.Н., Кудров А.В., Тараканова И.В. Статистический анализ и моделирование взаимосвязи региональной экономики и науки // *Экономика и математические методы*. 2022. Т. 58. № 4. С. 56–70.
18. Регионы России. Социально-экономические показатели, 2017–2019 гг. М.: Росстат, 2020.
19. Отчеты о налоговой базе и структуре начислений по налогам и сборам за 2019–2020 гг. [Электронный ресурс]: https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/statistics_and_analytics/forms/ (дата обращения 14.02.2023).
20. Афанасьев М.Ю., Кудров А.В. Экономическая сложность и вложенность структур региональных экономик // *Экономика и математические методы*. 2021. Т. 57. № 3. С. 67–78.
21. Bierens H.J. Topics in advanced econometrics estimation, testing, and specification of cross-section and time series models. Cambridge University Press, 1994.
22. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. Springer, 2006.
23. Ratkowsky D. Principles of nonlinear regression modeling // *Journal of Industrial Microbiology*. 1993. Vol. 12. P. 195–199.
24. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear regression. New York: Wiley–Interscience, 2003.
25. Gretton A., Fukumizu K., Harchaoui Z., Sriperumbudur B.K. A kernel statistical test of independence // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2009. P. 1067–1074.
26. Hausman J.A. Specification tests in econometrics // *Econometrica*. 1978. Vol. 46(6). P. 1251–1271.

Об авторе

Кудров Александр Владимирович

кандидат физико-математических наук;

ведущий научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

Email: kovlal@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-2495-5496

The impact of economic complexity and industry specialization on the gross regional product of Russian regions

Alexander V. Kudrov

E-mail: kovlal@inbox.ru

Central Economic and Mathematical Institute, Russian Academy of Sciences

Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

Abstract

The economic complexity index defines the basis of the modern theory of economic complexity and reflects the level of knowledge embedded in the production structure of the economy. This study examines the direct relationship between the economic complexity index and gross regional product (GRP) while taking into account other factors of the GRP production function in its generalized representation. As a result, we can isolate the impact of the economic complexity index from other phenomena. The non-linear nature of the relationship between economic complexity and GRP is revealed, and the direct relationship is manifested only at sufficiently high values of economic complexity, exceeding a certain threshold, which is found endogenously using econometric methods. In addition, the paper studies the relationship between economic complexity and indices of sectoral specialization. We found that there is a direct relationship between economic complexity and the extractive industry index and no relationship with the level of development of manufacturing industry. We obtained a clarification of the generalized production function of GRP, in which the threshold effect of the influence of economic complexity manifested itself as a factor of nonlinear dependence describing the elasticity of labor: a high level of economic complexity provides greater labor productivity. Overall, the results of the study of the dependence of GRP on economic complexity lead to the conclusion that increasing economic complexity can be an effective way to stimulate economic growth and development, but only starting from a certain threshold level. This suggests that an economy must reach a minimum level of diversity and complexity in its industrial activities before it can experience the productivity gains necessary for substantial GRP growth.

Keywords: economic complexity index, sectoral specialization, generalized production function, direct relationships, nonparametric regression, nonlinear regression, returns to scale

Citation: Kudrov A.V. (2023) The impact of economic complexity and industry specialization on the gross regional product of Russian regions. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 25–40. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

References

1. Hirschman A.O. (1958) *The strategy of economic development*. New Haven: Yale Univ. Press.
2. Rosenstein-Rodan P.N. (1943) Problems of industrialization of eastern and southeastern Europe. *The Economic Journal*, vol. 53(210/211), pp. 202–211.

3. Teece D., Rumelt R., Dosi G., Winter S. (1994) Understanding corporate coherence: Theory and evidence. *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 23(1), pp. 1–30.
4. Bernard A.B., Jones C.I. (1996) *Productivity and convergence among U.S. States*. National Bureau of Economic Research.
5. Imbs J., Wacziarg R. (2003) Stages of diversification. *The American Economic Review*, vol. 93(1), pp. 63–86.
6. Boschma R., Iammarino S. (2009) Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy. *Economic Geography*, vol. 85(3), pp. 289–311.
7. Frenken K., Oort F.V., Verburg T. (2007) Related variety, unrelated variety and regional economic growth. *Regional Studies*, vol. 41(5), pp. 685–697.
8. Frenken K., Saviotti P. (2008) Export variety and the economic performance of countries. *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18(2), pp. 201–218.
9. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Chung S., Jimenez J., Simoes A. (2007) The building blocks of economic complexity. *PLoS One*, vol. 2(1), e268.
10. Hausmann R., Hidalgo C.A. (2017) *Atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.
11. Hidalgo C.A., Hausmann R. (2009) The building blocks of economic complexity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367(1897), pp. 1817–1825.
12. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Simoes A., Yildirim M.A., Hwang J. (2014) *The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.
13. Ravallion M. (2004) Competing concepts of inequality in the globalization debate. *Brookings Trade Forum Globalization, Poverty, and Inequality*, pp. 1–38. Available at: <https://www.jstor.org/stable/25063189> (accessed 14 February 2023).
14. Hartmann D., Guevara M.R., Jara-Figueroa C., Aristarán M., Hidalgo C. (2017) Linking economic complexity, institutions, and income inequality. *World Development*, vol. 93, pp. 75–93.
15. Hidalgo C.A., Klinger B., Barabási A.L., Hausmann R. (2007) The product space conditions the development of nations. *Science*, vol. 317(5837), pp. 482–487.
16. Gavrilets Y.N., Kudrov A.V., Tarakanova I.V. (2018) Analysis of the internal structure of economic growth potential. *Bulletin of CEMI RAS*, vol. 1, no. 1 (in Russian).
17. Gavrilets Y., Kudrov A., Tarakanova I. (2022) Statistical analysis and modeling of regional economy and science relationship. *Ekonomika i matematicheskie metody*, vol. 58(4), pp. 56–70. <https://doi.org/10.31857/S042473880023019-9> (in Russian).
18. *Regions of Russia. Socio-economic indicators, 2017–2019*. Moscow: Rosstat (in Russian).
19. *2019–2020 tax base and accrual structure reports for taxes and levies*. Available at: https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/statistics_and_analytics/forms/ (accessed 14 February 2023) (in Russian).
20. Afanasiev M., Kudrov A. (2021) Economic complexity and embedding of regional economies' structures. *Ekonomika i matematicheskie metody*, vol. 57(3), pp. 67–78. <https://doi.org/10.31857/S042473880016410-0> (in Russian).
21. Bierens H.J. (1994) *Topics in advanced econometrics estimation, testing, and specification of cross-section and time series models*. Cambridge University Press.
22. Bishop C.M. (2006) *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
23. Ratkowsky D. (1993) Principles of nonlinear regression modeling. *Journal of Industrial Microbiology*, vol. 12, pp. 195–199.
24. Seber G.A.F., Wild C.J. (2003) *Nonlinear Regression*. New York: Wiley–Interscience.
25. Gretton A., Fukumizu K., Harchaoui Z., Sriperumbudur B.K. (2009) A kernel statistical test of independence. *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 1067–1074.
26. Hausman J.A. (1978) Specification tests in econometrics. *Econometrica*, vol. 46(6), pp. 1251–1271.

About the author

Alexander V. Kudrov

Cand. Sci. (Phys.-Math.);

Leading Researcher, Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: kovlal@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-2495-5496