

УДК 556.182: 504.062.2

© А. В. Кутышкин, д-р техн. наук, профессор  
© О. В. Шульгин, канд. экон. наук, доцент  
(Нижевартовский государственный университет,  
Нижевартовск, Россия)  
E-mail: avk\_200761@mail.ru, shul.oleg.val@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-6-58-70

© A. V. Kutyshkin, Dr. Sci. Tech., Professor  
© O. V. Shulgin, PhD in Sci. Ec., Associate Professor  
(Nizhnevartovsk State University,  
Nizhnevartovsk, Russia)  
E-mail: avk\_200761@mail.ru, shul.oleg.val@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ «ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ – ДАВЛЕНИЕ – СОСТОЯНИЕ – ВЛИЯНИЕ – РЕАГИРОВАНИЕ» ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ)

### USING THE “DRIVING FORCES–PRESSURE–STATE–INFLUENCE–RESPONSE” MODEL TO ANALYZE THE FUNCTIONING OF REGIONAL WATER CONSUMPTION SYSTEM (ON THE EXAMPLE OF YUGRA, THE KHANTY-MANSI AUTONOMOUS REGION)

Представлены результаты комплексной оценки состояния региональной системы водопотребления (РСВП) Ханты-Мансийского автономного округа–Югры в период с 2013 по 2022 гг. На основании модели «движущие силы–давление–состояние–воздействие–реагирование», методов взвешивания информационной энтропии показателей и таксонометрического показателя вычислялся комплексный показатель состояния РСВП. Наибольшее влияние на состояние РСВП оказывают значения компонентов «давление», «состояние» и «реагирование». Состояние РСВП с 2013 по 2018 гг. ухудшалось от «хорошего» до «ниже среднего», но с 2019 г. ситуация стабилизировалась при незначительном росте значений комплексного показателя состояния рассматриваемой системы.

*Ключевые слова:* водопотребление региона, RWCS, метод взвешивания информационной энтропии показателей, метод таксонометрического показателя.

The paper presents the results of comprehensive assessment of the state of the regional water consumption state (RWCS) in Yugra, the Khanty-Mansi Autonomous Region, in the period from 2013 to 2022. Based on the “Driving forces–pressure–state–influence–response” model, methods for weighing the information entropy of indicators and a taxonomic indicator, a comprehensive indicator of the RWCS was calculated. The values of the “pressure”, “state” and “response” components have the greatest influence on the RWCS. The state of the RWCS from 2013 to 2018 deteriorated from “good” to “below average”, but since 2019 the situation has stabilized with a slight increase in the values of the comprehensive indicator of the state of the system in question.

*Keywords:* regional water consumption, RWCS, method of weighing the information entropy of indicators, taxonomic indicator method.

#### Введение

Региональная система водопотребления (РСВП) — это совокупность водных ресурсов, систем водопотребления и непосредственно потребителей этого вида

природного ресурса. Данная система относится к категории больших систем [1], для исследования функционирования которых в настоящее время достаточно активно используются непараметрические методы

и модели [2, 3] и, в частности, модель «движущие силы–давление–состояние–воздействие–реагирование» (ДС–Д–С–В–Р)<sup>1</sup> [3, 4], или *DPSIR* (Driver–Pressure–State–Impact–Response)<sup>2</sup> [5–6]. Далее будем использовать аббревиатуру *DPSIR* как наиболее распространенную.

Модель *DPSIR* показывает причинно-следственные связи между показателями, характеризующими компоненты «движущие силы», «давление», «состояние», «воздействие» и «реагирование» рассматриваемой системы [5–8]. Компонент «движущие силы» (*DF*) характеризует основные потребности общества, развитие экономики, рост населения и т. д. Для удовлетворения этих потребностей соответствующая деятельность человека в социально-экономических процессах может увеличивать или смягчать компонент «давление» (*P*) (имеется в виду «давление на окружающую среду», например, эмиссия загрязняющих веществ и выбросов, сброс неочищенных вод и т. п.). «Давление» влияет на биологическое, физическое, химическое состояния окружающей среды — компонент «состояние» (*S*). Изменения окружающей среды формируют компонент «воздействие» (*I*) — влияние на экосистему, здоровье человека и другие социально-экономические аспекты развития региона. «Реагирование» (*R*) относится к действиям социума, которые вытекают из нежелательного «воздействия» для смягчения «давления», повышения качества изменяющейся окружающей среды и могут быть нацелены на любой этап модели *DPSIR* [5, 7, 8].

Таким образом, по мнению авторов, тематика исследования актуальна, поскольку его

результаты дают возможность получения комплексных оценок состояния РСВП. При этом учитываются влияние ключевых факторов социально-экономического развития региона, характер и интенсивность антропогенного воздействия на водопотребление, степень влияния имеющихся обратных связей в виде системных управленческих и организационно-технических решений для нивелирования обозначенных воздействий и развития рассматриваемой системы в целом.

Модель *DPSIR* также активно применяется в различных исследованиях, связанных с оценкой состояния, развития и функционирования эколого-экономических и социальных систем различной сложности по таким направлениям, как выбросы загрязняющих веществ в атмосферу [7–9], загрязнение водной среды регионов [10–13]. Для нивелирования влияния субъективности выбора показателей каждого из компонентов модели *DPSIR*, а также их влияния на значение результирующего комплексного индекса (КИ), характеризующего состояние или функционирование системы в целом, для оценки весовых коэффициентов (ВК) этих показателей применяют метод взвешивания информационной энтропии показателей (МВИЭП). В рамках МВИЭП при вычислении энтропии показателей и соответственно значений весовых коэффициентов можно непосредственно использовать как их значения, так дисперсии значений показателей [9–13]. Учитывая сложную структуру показателей компонентов модели *DPSIR*, для получения количественных оценок КИ, как правило, используют наиболее распространенные алгоритмы метода таксонометрического показателя (МТП) [14, 15] или *TOPSIS* (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [16–19], которые не имеют существенных ограничений по количеству показателей, используемых для исчисления КИ, их структуре и содержанию. При этом КИ оцениваются как расстояние от состоя-

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ «Положение о подготовке и распространении ежегодного государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды» от 24.09.2012 № 966 (ред. от 10.09.2014). URL: <http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-ot-24092012-n-966>

<sup>2</sup> Organization for Economic Cooperation and Development. Environmental Indicators: Development, Measurement and Use; Organization for Economic Cooperation and Development: Paris, France. 2003. Pp. 13–15.

ния рассматриваемой системы/объекта до виртуальных систем с наилучшими и наихудшими значениями выбранных показателей. Интерпретация полученных оценок состояния или функционирования исследуемой большой системы, как правило, базируется на общепринятых шкалах качественных оценок состояния таких систем [18–21].

Целью исследования является комплексная оценка состояния системы водопотребления Ханты-Мансийского автономного округа–Югры на основе модели *DPSIR*, методов взвешивания информационной энтропии показателей и таксонометрического показателя.

Новым подходом в работе является использование комплексных оценок состояния системы водопотребления, полученных с использованием модели *DPSIR*, показатели и компоненты которой характеризуют развитие системы водопотребления региона под воздействием изменений его экономики и антропогенного влияния населения на окружающую среду. При определении весовых коэффициентов показателей и компонентов модели *DPSIR* применялся метод взвешивания информационной энтропии. На основании полученных расчетных *ВК* показателей и компонентов методом таксонометрического показателя рассчитывались значения комплексного показателя состояния системы водопотребления региона для интервала с 2013 по 2022 гг.

#### Методы

Для оценки состояния системы водопотребления региона использовались следующие модели и методы.

Модель *DPSIR*, которая представляет собой аналитический инструмент системной оценки и анализа взаимодействия деятельности человека и окружающей среды [7–12]. Результирующим показателем данной модели является комплексный индекс (*КИ*, *KI*). Количественные значения *KI* соотносят со шкалой, диапазоны значений которой соот-

ветствуют определенному типу состояния рассматриваемой системы.

Компонентами модели *DPSIR* являются:

1. «Движущие силы» (*DF*) — это базовые факторы или процессы, которые влияют на деятельность человека и оказывают воздействие на окружающую среду. Данный компонент может включать социально-экономические, производственно-технологические процессы и факторы, такие как показатели развития промышленности и экономики, изменение численности населения, урбанизация региона и т. п.

2. Компонент «давление» (*P*) характеризуется конкретными антропогенными действиями, или видами деятельности человека, оказывающими давление или формирующими нагрузку на окружающую среду. Они могут быть прямыми или косвенными и включают такие факторы, как выбросы загрязняющих веществ, добыча ресурсов, изменения в землепользовании, разрушение среды обитания и деятельность, связанную с изменением климата.

3. Компонент «состояние» (*S*) описывает текущее состояние окружающей среды и включает в себя мониторинг и оценку ее различных параметров, таких как качество воздуха, качество воды, уровни биоразнообразия, состояние экосистемы и доступность природных ресурсов.

4. Компонент «воздействие» (*I*) представляет собой последствия или эффекты от «давления», оказываемого на окружающую среду. Данный компонент отражает прямое и косвенное воздействие на здоровье человека, природные ресурсы и социально-экономические системы. Примерами являются потеря биоразнообразия, состояние или нехватка водных ресурсов, проблемы со здоровьем населения, связанные с загрязнением воздуха, и сопутствующие экономические издержки.

5. Компонент «реагирование» (*R*) включает в себя меры и действия, предпринимаемые

социально-экономической системой в ответ на выявленные экологические проблемы. Этот компонент может включать в себя политику, правила, стратегии управления, технологические инновации, кампании по повышению осведомленности и международное сотрудничество, направленное на смягчение или адаптацию к воздействиям, устранение движущих сил и снижение давления на окружающую среду.

Указанные компоненты модели *DPSIR* в каждый момент времени из наблюдаемого интервала  $[t_0, T]$  характеризуются набором показателей, которые фиксируются действующей системой государственной статистики. В табл. 1 приведены компоненты модели *DPSIR* для оценки состояния РСВП ХМАО–Югры и соответствующие им показатели. Также представлены признаки влияния показателей элементов на состояние системы водопотребления региона: «+» — положительное влияние, «-» — негативное влияние. Общее количество показателей компонентов табл. 1 равно 18 ( $J = 18$ ), количество показателей каждого компонента модели *DPSIR*: компонент *DF* —  $JDF = 3$ , компонент *P* —  $JP = 4$ , компонент *S* —  $JS = 4$ , компонент *I* —  $II = 3$ , компонент *R* —  $JR = 4$ .

Показатели всех компонентов, за исключением компонента *S*, имеют однородные признаки влияния на состояние РСВП, что предопределяет характер влияния этих компонентов на состояние данной системы в целом. Для компонента *S* влияние на состояние системы будет определяться соотношениями значений весовых коэффициентов показателей, входящих в его состав. Используемый для оценки весовых коэффициентов показателей модели *DPSIR* МВИЭП учитывает значения каждого показателя модели и соответствующие изменения, чтобы в определенной степени избежать влияния человеческого фактора при выборе показателей и объективно отразить уровень их важности при исследовании рассматриваемой системы [9–13].

Реализация МВИЭП предусматривает следующие процедуры:

1. Анализ наличия среди показателей компонентов (см. табл. 1) квазипостоянных [14, 15], для которых коэффициент вариации  $v_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) за интервал  $[t_0; T]$  меньше 0,1:  $v_j < 0,1$ . При выполнении данного ограничения  $j$ -й показатель исключается из табл. 1.

2. Показатели компонентов модели *DPSIR* нормируются ( $j = 1, \dots, J$ ) с учетом обозначенного их влияния на состояние и развитие РСВП:

• показатели, способствующие развитию системы:

$$r_j(t) = \frac{x_j(t) - x_{\min_j}}{x_{\max_j} - x_{\min_j}}; \quad x_{\max_j} = \max_{t=t_0}^T(x_j(t));$$

$$x_{\min_j} = \min_{t=t_0}^T(x_j(t)); \quad (1)$$

• показатели, оказывающие негативное влияние на развитие системы:

$$r_j(t) = \frac{x_{\max_j} - x_j(t)}{x_{\max_j} - x_{\min_j}}. \quad (2)$$

Здесь  $x_j(t)$  — значение  $j$ -го показателя компонента для года  $t$ .

3. Определяется информационная энтропия  $j$ -го показателя компонента модели *DPSIR*:

$$e_j = -\frac{1}{J} \sum_{t=t_0}^T [R_j(t) \cdot \ln R_j(t)]; \quad R_j(t) = \frac{r_j(t)}{\sum_{t=t_0}^T r_j(t)}. \quad (3)$$

При  $R_j(t) = 0 \rightarrow \ln R_j(t) = 0$ .

4. Рассчитывается ВК  $j$ -го показателя компонента *DPSIR*:

$$W_j = \frac{1 - e_j}{J - \sum_{j=1}^J (e_j)}; \quad \sum_{j=1}^J W_j = 1; \quad 0 < W < 1. \quad (4)$$

Далее определяются весовые коэффициенты компонентов модели *DPSIR*:

$$WDF = \sum_{j=1}^{JDF} W_j; \quad WP = \sum_{j=1}^{JP} W_j; \quad WS = \sum_{j=1}^{JS} W_j;$$

$$WI = \sum_{j=1}^{II} W_j; \quad WR = \sum_{j=1}^{JR} W_j. \quad (5)$$

Таблица 1

**Система компонентов и показателей модели DPSIR оценки состояния системы водопотребления ХМАО–Югры**

Компонент модели DPSIR	Показатель компонента модели DPSIR	Признак влияния показателя
Движущие силы (Driving forces, DF)	Валовой региональный продукт (ВРП) на душу населения, тыс. руб. (DF1)	+
	Уровень урбанизации региона, % (DF2)	+
	Плотность населения региона, чел./тыс. кв. км (DF3)	+
Давление (Pressure, P)	Забор пресной воды на единицу ВРП, тыс. куб. м / млн руб. (P1)	-
	Объем водохозяйственного потребления на душу населения, тыс. м <sup>3</sup> /чел. (P2)	-
	Объем производственного водопотребления на единицу ВРП, тыс. м <sup>3</sup> / млн руб. (P3)	-
	Объем сброшенных в водоемы загрязненных вод на единицу ВРП, тыс. м <sup>3</sup> / млн руб. (P4)	-
Состояние (State, S)	Водные ресурсы на единицу площади региона, млн м <sup>3</sup> / тыс. кв. км (S1)	+
	Водные ресурсы на душу населения региона, млн м <sup>3</sup> /чел. (S2)	+
	БПК <sub>5</sub> — биохимическое потребление кислорода за 5 суток, мг/л при температуре 20 °С, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> (S3)	-
	ХПК (COD) — химическое потребление кислорода для нейтрализации трудноокисляемых органических веществ, мг/л (S4)	-
Воздействие (Impact, I)	Качество воды из источников (доля проб воды из источников, неудовлетворительной по санитарно-химическим показателям и гигиеническим нормативам по микробиологическим показателям, %) (I1)	+
	Качество питьевой воды (доля проб питьевой воды из водопровода, не соответствующей нормам по санитарно-химическим показателям и гигиеническим нормативам по микробиологическим показателям, %) (I2)	+
	Доля или объем воды из источников, соответствующей 1–2-му классам принятого стандарта качества (I3)	+
Реагирование (Response, R)	Доля оборотной воды в общем объеме потребляемой воды (R1)	+
	Доля населения региона, обеспеченная доступом к питьевой воде (R2)	+
	Текущие затраты на охрану водных ресурсов, тыс. руб. (R3)	+
	Доля инвестиций в основные фонды по охране водных ресурсов от общих инвестиций в основные фонды по экономике региона (R4)	+

Для оценки влияния изменений значений компонентов модели DPSIR (см. табл. 1) на состояние РСВП предлагается использовать зависимости

$$DF(t) = \sum_{j=1}^{JDF} W_j \cdot r_j(t); P(t) = \sum_{j=1}^{JP} W_j \cdot r_j(t);$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^{JS} W_j \cdot r_j(t); \quad (6)$$

$$I(t) = \sum_{j=1}^{JI} W_j \cdot r_j(t); R(t) = \sum_{j=1}^{JR} W_j \cdot r_j(t). \quad (7)$$

**Метод таксонометрического показателя** реализуется по следующему алгоритму:

1. Весовые коэффициенты  $W_j$  (формула (4)) используются в методах МТП и TOPSIS [16–20] при построении взвешенной матрицы приведенных исходных показателей компонентов  $x_j(t)$ , элементы которой определяются выражением

$$Y_j(t) = W_j \cdot Z_j(t), \quad (8)$$

где

$$Z_j(t) = \frac{z_j(t)}{\sqrt{\sum_{t=t_0}^T z_j^2(t)}}$$

$$z_j(t) = \begin{cases} x_j(t), & \text{если влияние базисного показателя положительное;} \\ [x_j(t)]^{-1}, & \text{если влияние базисного показателя негативное.} \end{cases}$$

2. Величины  $Y_j(t)$  в МТП используются для определения эталонных объектов — состояний водных ресурсов (эталон): состояние «эталон» (верхний полюс) и состояние «антиэталон» (нижний полюс), которые описываются наилучшими и наихудшими значениями показателей соответственно [15–20]:

- верхний полюс

$$Y_j^+(t) = \left\{ \max Y_j(t) \middle| t = t_0, \dots, T \right\} = \left\{ \max Y_j(t) \middle| Y_1^+(t), \dots, Y_J^+(t) \right\};$$

- нижний полюс

$$Y_j^-(t) = \left\{ \min Y_j(t) \middle| t = t_0, \dots, T \right\} = \left\{ \min Y_j(t) \middle| Y_1^-(t), \dots, Y_J^-(t) \right\}.$$

3. Определяется евклидово расстояние от положения рассматриваемой системы до сформированных верхнего и нижнего полюсов для момента времени  $t$  [15–20]:

- расстояние до верхнего полюса

$$D_j^+(t) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (Y_j^+(t) - Y_j(t))^2}; \quad (9)$$

- расстояние до нижнего полюса

$$D_j^-(t) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (Y_j^-(t) - Y_j(t))^2}. \quad (10)$$

4. Для момента времени  $t$  рассчитывается количественная оценка  $KI(t)$  РСВП:

$$KI(t) = \frac{D_j^-(t)}{D_j^+(t) + D_j^-(t)}. \quad (11)$$

Тип состояния региональной системы водопользования региона предлагается определять с использованием классификации, предложенной в работах [19–21] (табл. 2). Эта классификация ориентирована на дифференциацию состояний больших эколого-экономических и социальных систем, для

описания функционирования которых используются непараметрические методы.

В качестве источников данных о значениях показателей компонентов  $DPSIR$  использовались ежегодно публикуемые статистические справочники Росстата РФ<sup>3</sup>, отчеты о состоянии окружающей среды РФ Минприроды РФ и МГУ им. М. В. Ломоносова<sup>4</sup>, Официальная статистика региональных управлений государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу–Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу<sup>5</sup>, справочники ФГБУ «Гидрохимический институт» Росгидромета «Качество поверхностных вод Российской Федерации»<sup>6</sup>, Государственные доклады Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации»<sup>7</sup>. На рис. 1–3 представлены диаграммы динамики исходных статистических данных<sup>3–7</sup> о функционировании региональных социально-экономических систем ХМАО–Югры за период с 2013

<sup>3</sup> Регионы России. Социально-экономические показатели. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 21.01.2025).

<sup>4</sup> Государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации». URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/) (дата обращения: 25.12.2024).

<sup>5</sup> Официальная статистика Управления Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу–Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. URL: [https://72.rosstat.gov.ru/ofstat\\_ynaо](https://72.rosstat.gov.ru/ofstat_ynaо) (дата обращения: 18.01.2025).

<sup>6</sup> Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. Ростов н/Д: ФГБУ «Гидрохимический институт». URL: <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения: 22.01.2025).

<sup>7</sup> Запасы пресной воды. Государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации». URL: <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/doklad/vodnye-resursy/sostoyanie-vodnyh-resursov/zapasy-presnoy-vody/> (дата обращения: 20.12.2024).

Таблица 2

Классификация состояний региональной системы водопользования ХМАО–Югры

Комплексный индекс	Крайне низкое (V)	Ниже среднего (IV)	Среднее (III)	Хорошее (II)	Отличное (I)
$KI(t)$	(0–0,2]	(0,2–0,4]	(0,4–0,6]	(0,6–0,8]	(0,8–1]

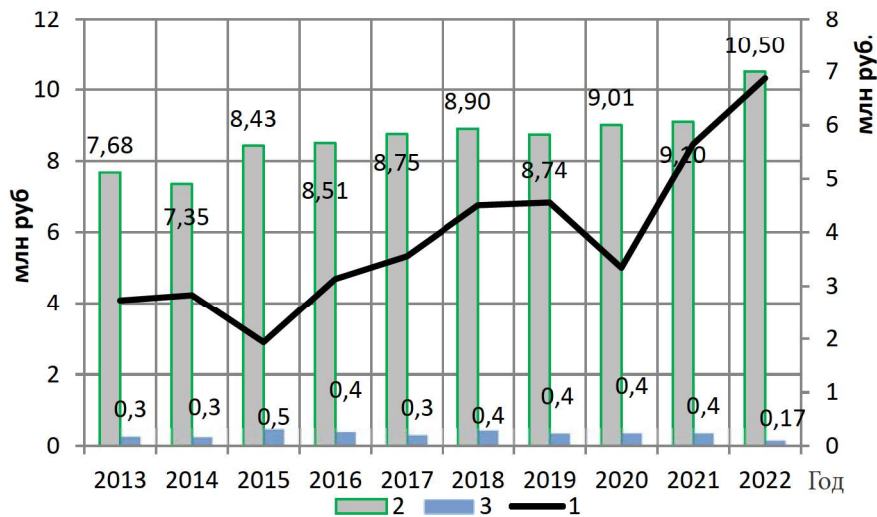


Рис. 1. Динамика значений валового регионального продукта (1), текущих затрат на сбор и очистку сточных вод (2) и затрат на капитальный ремонт основных фондов по охране водных ресурсов (3). Все стоимостные величины приведены в текущих ценах

по 2022 г., которые были использованы для расчета значений показателей модели *DPSIR* (см. табл. 1). Площадь региона постоянна и равна 534,1 тыс. кв. км. Уровень урбанизации региона также постоянный и равен 92 %. Перед расчетом значений показателей компонентов модели *DPSIR* все стоимостные

данные приводились к сопоставимым ценам 2013 г.

#### Результаты

В табл. 3 приведены расчетные значения весовых коэффициентов показателей и компонентов модели *DPSIR* для РСВП ХМАО–Югры за период с 2013 по 2022 г.

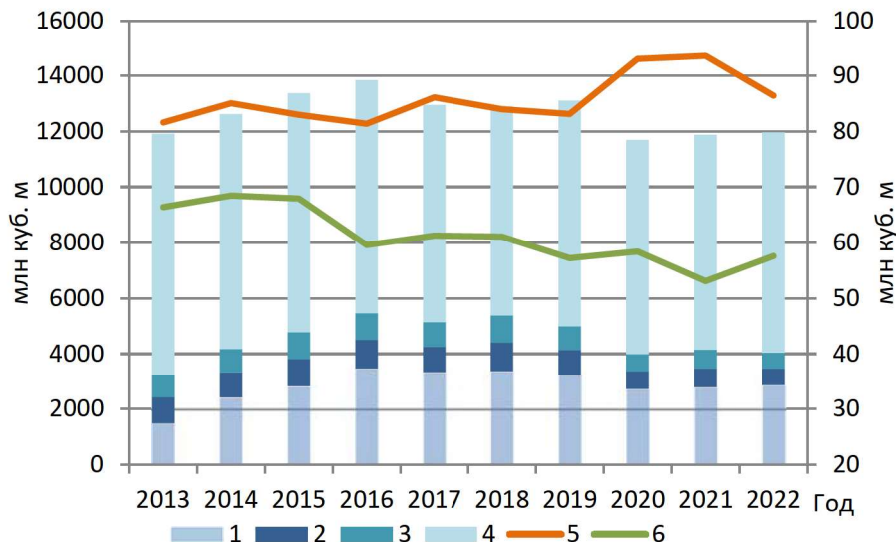


Рис. 2. Значения показателей водопотребления округа (млн куб. м): 1 — объем забора свежей пресной воды; 2 — объем производственного водопотребления; 3 — объем водоотведения; 4 — объем оборотного и повторного водоснабжения; 5 — суммарный объем сброса неочищенной и недостаточно очищенной воды; 6 — объем потребления воды на питьевые и хозяйственные нужды

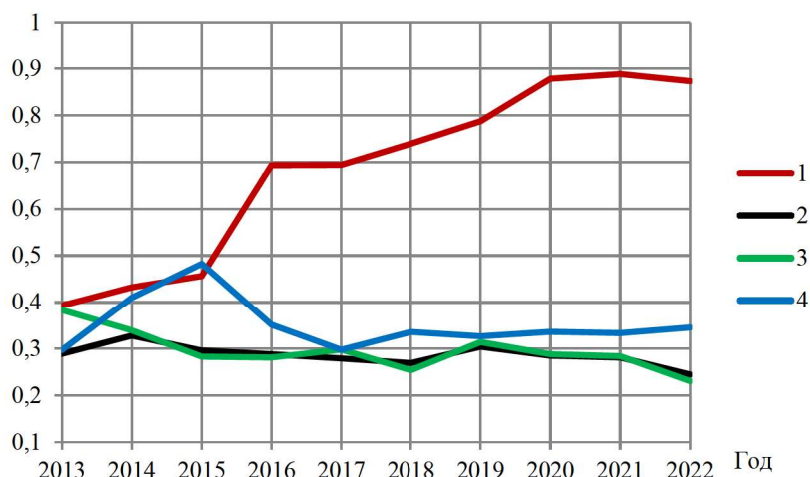


Рис. 3. Динамика значений показателей, характеризующих качество водных источников и обеспеченность населения округа питьевой водой: 1 — доля населения региона, обеспеченная доступом к питьевой воде; 2 — доля проб воды, неудовлетворительной по санитарно-химическим показателям; 3 — доля проб воды, неудовлетворительной по санитарно-биологическим показателям; 4 — доля потребляемых объемов воды из подземных источников, соответствующей I–III классам стандартизации качества

Таблица 3  
**Расчетные значения весовых коэффициентов показателей и компонентов модели DPSIR для РСВП ХМАО–Югры за период с 2013 по 2022 гг.**

Компонент модели DPSIR	Вес компонента модели DPSIR (формула (5))	Показатель компонента DPSIR	Вес показателя компонента модели DPSIR (формула (4))
DF	0,1173	DF1	0,0396
		DF2	0,0378
		DF3	0,0399
P	0,2481	P1	0,0581
		P2	0,0615
		P3	0,0617
		P4	0,0668
S	0,2758	S1	0,0629
		S2	0,0604
		S3	0,0767
		S4	0,0759
I	0,1135	I1	0,0424
		I2	0,0360
		I3	0,0351
R	0,2452	R1	0,0579
		R2	0,0681
		R3	0,0579
		R4	0,0613

Наименьшие значения BK у показателей компонентов  $DF$  и  $I$ , а наибольшие — у показателей компонентов  $S$ ,  $P$  и  $R$ . Весовой коэффициент компонента  $S$  ( $BK = 0,2758$ ) наибольший, у компонентов  $P$  и  $R$  весовые коэффициенты на 8 и 11 % меньше. Весовые коэффициенты компонентов  $DF$  ( $BK = 0,1173$ ) и  $I$  ( $BK = 0,1135$ ) более чем в два раза меньше значений BK компонентов  $S$ ,  $P$  и  $R$ . Расчетные изменения значений величин  $DF(t)$ ,  $P(t)$ ,  $S(t)$ ,  $I(t)$  и  $R(t)$  компонентов модели DPSIR, определяемые согласно формулам (6), (7) для РСВП за период с 2013 по 2022 гг., приведены в табл. 4.

Значения компонента  $DF(t)$  демонстрируют нисходящий тренд, причем значения за наблюдаемый период уменьшаются более чем в 10 раз. Это обусловлено снижением валового регионального продукта (ВРП) на душу населения региона на фоне практически стабильных значений уровня урбанизации и незначительным (в пределах 3...5 %) ростом населения региона. Значение компонента  $P(t)$  после кратковременного роста с 2013 по 2015 гг. также устойчиво снижается

Таблица 4

**Изменения значений  $DF(t)$ ,  $P(t)$ ,  $S(t)$ ,  $I(t)$  и  $R(t)$  компонентов модели  $DPSIR$  РСВП ХМАО–Югры за период с 2013 по 2022 гг.**

Год, $t$	$DF(t)$	$P(t)$	$S(t)$	$I(t)$	$R(t)$
2013	0,110	0,105	0,103	0,048	0,110
2014	0,111	0,166	0,046	0,024	0,139
2015	0,095	0,187	0,078	0,025	0,150
2016	0,093	0,158	0,037	0,070	0,159
2017	0,071	0,137	0,067	0,080	0,163
2018	0,050	0,150	0,133	0,090	0,187
2019	0,046	0,115	0,149	0,052	0,137
2020	0,062	0,142	0,165	0,072	0,127
2021	0,016	0,060	0,192	0,077	0,143
2022	0,004	0,057	0,195	0,104	0,096

при кратковременных пиковых повышениях в 2018 и 2020 гг. В среднем за период с 2013 по 2022 гг. снижение  $P(t)$  составило 40 %, что обусловлено снижением водоемкости ВРП региона, слабыми, но устойчивыми понижательными трендами объемов водопотребления населения и объемов недостаточно очищенной и неочищенной воды, сбрасываемой в водоемы региона. Влияние компонента  $R(t)$  до 2017 г. на состояние РСВП практически неизменно. После локального годичного повышения в 2018 г. значения  $R(t)$  характеризуются нисходящим трендом, уменьшаясь более чем в два раза к 2022 г. Влияние на состояние рассматриваемой системы двух компонентов —  $S(t)$  и  $I(t)$  характеризуется восходящими трендами соответствующих значений.  $I(t)$  демонстрирует устойчивый рост с 0,024 в 2014 г. до 0,104 в 2022 г. Значения  $S(t)$  после колебаний с 2013 по 2016 гг. в диапазоне от 0,103 до 0,037 сформировали интенсивный восходящий тренд с более чем трехкратным ростом значений к 2022 г. В табл. 5 приведены расчетные значения комплексного индекса состояния  $KI(t)$  (формула (11)) региональной системы водопользования ХМАО–Югры и соответствующие показатели типа состояния из табл. 3 в период с 2013 по 2022 гг.

Таблица 5

**Расчетные значения комплексного индекса состояния  $KI(t)$  и показатели типа состояния РСВП ХМАО–Югры за период с 2013 по 2022 гг.**

Год, $t$	2013	2014	2015	2016	2017
$KI(t)$	0,664	0,607	0,466	0,368	0,365
Состояние РСВП	II	II	III	IV	IV
Год, $t$	2018	2019	2020	2021	2022
$KI(t)$	0,282	0,347	0,368	0,373	0,379
Состояние РСВП	IV	IV	IV	IV	IV

Изменения комплексного показателя  $KI(t)$  с 2013 до 2018 г. характеризовались достаточно устойчивым понижательным трендом его значений от 0,664 до 0,282. РСВП за этот период перешла от состояния «хорошее» до состояния «ниже среднего». Начиная с 2019 г. по 2022 г. значения  $KI(t)$  незначительно увеличиваются, формируя слабый восходящий тренд, однако при этом рассматриваемая система не выходит из состояния «низкий уровень».

#### Обсуждение

Весовые коэффициенты отражают влияния компонентов модели  $DPSIR$  и их показателей на состояние и развитие системы. Значения ВК формируют две группы компонентов. В первую входят компоненты  $P$ ,  $S$  и  $R$ , значения ВК которых более чем в два раза больше ВК компонентов второй группы —  $DF$  и  $I$ . Таким образом, компоненты первой группы характеризуются наибольшими долями влияния на состояние системы. Это проявляется и при оценке динамики влияния компонентов модели  $DPSIR$  в интервале с 2013 по 2022 гг. (см. табл. 5). Так, признак компонентов  $DF$ ,  $I$ ,  $R$  согласно табл. 1 положительный («+»), поэтому достаточно существенное снижение значений компонентов  $DF(t)$  и  $R(t)$  предопределяет их общее негативное влияние на состояние РСВП. Значения компонента  $I(t)$  формируют восходящий тренд, и его влияние на состояние системы положительное. Признак влияния компонента  $P$  отрицательный («-») (см. табл. 1),

но его значения характеризуются с 2015 г. устойчивым снижением, что положительно влияет на состояние РСВП. Компонент  $S$  согласно табл. 1 имеет как положительное, так и отрицательное влияние на состояние системы. ВК его показателей с признаком «+» на 20...27 % меньше, чем ВК показателей с признаком «-». Таким образом, рост значений  $S(t)$  в целом оказывает негативное влияние на состояние РСВП. Поведение значений показателя  $KI(t)$  в рассматриваемый интервал времени обусловлено как величинами ВК компонентов  $DPSIR$ , так и непосредственно динамикой их значений  $DF(t)$ ,  $P(t)$ ,  $S(t)$ ,  $I(t)$  и  $R(t)$ . ВК  $DF$  и  $I$  существенно меньше ВК  $S$ ,  $P$  и  $R$ . Вместе с тем только изменения значений компонентов  $P(t)$  и  $I(t)$  оказывают положительное влияние на состояние системы, т. е. на значения показателя  $KI(t)$ , а динамика остальных компонентов,  $DF(t)$ ,  $R(t)$  и  $S(t)$ , — отрицательная. Состояние РСВП с 2013 по 2018 гг. ухудшается от «хорошего (II)» до «ниже среднего (IV)». С 2019 по 2022 гг. состояние РСВП стабилизируется на уровне «ниже среднего (IV)» при незначительном росте  $KI(t)$ .

### Выводы

В данной работе при помощи модели  $DPSIR$  были получены комплексные оценки состояния системы водопотребления Ханты-Мансийского автономного округа–Югры за период с 2013 по 2022 гг. Модель  $DPSIR$  использовалась для построения комплекса компонентов и соответствующих им показателей, которые в совокупности описывают влияние на состояние РСВП развития экономики и общества региона. Наряду с этим данная модель отражает антропогенное воздействие на окружающую среду региона и обратную связь — реакцию общества на изменения окружающей среды. Типовые компоненты модели  $DPSIR$  в данной работе в совокупности объединяют 18 показателей, фиксируемых действующей системой государственной статистики и отражающих

состояние социально-экономического развития региона, его системы водопотребления и наличие организационно-технических решений по сохранению и развитию водных ресурсов в целом.

Влияние компонентов модели  $DPSIR$  и соответствующих им показателей на состояние региональной системы водопотребления определяется весовыми коэффициентами, для расчета которых использовался метод взвешивания информационной энтропии показателей (МВИЭП). Данный метод учитывает коэффициенты вариации значений каждого показателя, что позволяет более объективно отразить уровень их значимости при исследовании функционирования и состояния рассматриваемой системы. Наибольшие доли влияния соответствуют компонентам  $S$ ,  $P$  и  $R$ , доли влияния компонентов  $DF$  и  $I$  вдвое меньше.

Для оценки комплексного показателя состояния региональной системы водопотребления ХМАО–Югры в интервале с 2013 по 2022 гг. применялся метод таксонометрического показателя, в рамках которого, используя расчетные значения ВК компонентов модели  $DPSIR$ , определялись координаты объекта — рассматриваемой системы в пространстве нормированных показателей компонентов. Комплексный показатель состояния РСВП исчислялся как евклидово расстояние от системы в момент времени  $t$  до виртуальных наилучшего и наихудшего из ее потенциально возможных состояний.

Согласно расчетным значениям  $KI(t)$  и достаточно распространенной классификации состояний организационно-технических систем, состояние системы водопотребления ХМАО–Югры в период с 2013 г. до 2018 г. ухудшалось от «хорошего (II)» до «ниже среднего (IV)», в дальнейшем состояние рассматриваемой системы не улучшилось, несмотря на последующий незначительный восходящий тренд значений  $KI(t)$ .

Использование комплекса из модели DPSIR, метода взвешивания информационной энтропии показателей и метода таксонометрического показателя расширяет возможности оценивания и анализа состояния и функционирования больших эколого-экономических систем за счет учета влияния факторов социально-экономического развития данных систем, факторов, отражающих антропогенное воздействие на потребляемые природные ресурсы, динамику состояния последних, а также учета наличия и влияния обратных связей, отражающих принятие системных организационно-технических мероприятий по коррекции негативного влияния на окружающую среду.

#### Библиографический список

1. Бурков В. Н., Данев Б., Еналеев А. К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов / отв. ред. В. И. Опойцев. М.: Наука, 1989. 245 с.
2. Кутышкин А. В., Шульгин О. В. Использование динамического норматива для оценки экологического аспекта функционирования региональной системы потребительского водопользования // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6 (95). С. 108–116.
3. Фомина В. Ф., Фомин А. В. Эколого-экономическое развитие Республики Коми в аспекте «зеленого» роста // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018. № 1 (57). С. 85–98.
4. Андрюков Б. Г. Международные программные стратегии комплексного исследования влияния окружающей среды на здоровье // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2015. № 1 (59). С. 4–14.
5. Smeets E., Weterings R. Environmental Indicators: Typology and Overview. Report № 25. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark. 1999. 19 p.
6. Бардаханова Т. Б., Мункуева В. Д. Использование DPSIR для сравнения методологических подходов к измерению эколого-экономической информации // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2020. № 3. С. 12–21.
7. Xie L., Yao Y., Dan Z., Shi F., Yuan Y., Fang L., Yuan W. Evaluation of provincial green development performance based on DPSIR model // Journal of Environmental Engineering Technology. 2022. № 12 (5). Pp. 1681–1686.
8. Zhou Y., Zhang Z., Yu W., Chen X., Jiang W., Xu Y. Evaluation and Obstacle Factors of the Green Development Level of China's Oil and Gas Resource-Based Cities Based on DPSIR-TOPSIS Model // Polish Journal of Environmental Studies. 2025. Vol. 34 (2). Pp. 1481–1493.
9. Xu J., Wang H., Li Z. Evaluation of the Provincial Carbon Neutrality Capacity of the Middle and Lower Yellow River Basin based on the Entropy Weight Matter-Element Model // Energies. 2022. Vol. 15 (20). 7600.
10. Цзыцян Ч., Куреева М. С., Мурзин А. Д. Методика оценки эффективности управления развитием территорий бассейна реки Хуанхэ // Экономика и экология территориальных образований. 2023. № 7 (1). С. 20–27.
11. Lu M., Wang X., Liao W., Wang C., Lei X., Wang H. An Assessment of Temporal and Spatial Dynamics of Regional Water Resources Security in the DPSIR Framework in Jiangxi Province, China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19 (6). 3650.
12. Zhao M., Wei J., Han Y., Shi J., Wang S. Water resource security evaluation and barrier analysis in Henan Province utilizing the DPSIR framework // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol 12. 1354175.
13. Jia Y., Wang H. Study on Water Resource Carrying Capacity of Zhengzhou City Based on DPSIR Model // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20 (2). 1394.
14. Надтока Т. Б., Виноградов А. Г. Многомерное оценивание уровня социально-экономического развития предприятия // Бизнес Информ. 2014. № 1. С. 184–191.
15. Горбунов В. С., Шорохов С. И. Как построить рейтинг? Построение рейтинга регионов России таксонометрическим методом // Региональная экономика: теория и практика. 2023. Т. 21, № 6 (513). С. 1006–1019.
16. Zhang Y., Wei Y., Mao Y. Sustainability Assessment of Regional Water Resources in China Based on DPSIR Model // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8015.
17. Wu D., Liu M. Assessing adaptability of the water resource system to social-ecological systems in the Beijing-Tianjin-Hebei region: Based on the DPSIR-TOPSIS framework // Chinese Journal of Population, Resources and Environment. 2022. Vol. 20 (3). Pp. 261–269.
18. Deng W., Li X., Guo Y., Huang J., Zhang L. Ecological Assessment of Water Environment in Huizhou Region of China Based on DPSIR Theory and Entropy Weight TOPSIS Model // Water. 2024. Vol. 16 (18). 2579.
19. Li J., He W., Jiang E., Yuan L., Qu B., Degefu D. M., Ramsey T. S. Evaluation and prediction of water security levels in Northwest China based on the DPSIR model // Ecological Indicators. 2024. Vol. 163. 112045.
20. Bai Y., Qin J., Liu W., Li L., Wu Y., Zhang P. The DPSIR Model-Based Sustainability Assessment of Urban

Water Resources: A Comparative Study of Zhuhai and Macao // *Water*. 2024. Vol. 16 (10). 1413.

21. Алферова Т. В. Теоретико-методологический базис измерения устойчивого развития региональных систем // *Вестник Пермского ун-та. Сер. «Экономика»*. 2022. Т. 17, № 3. С. 304–320.

## References

1. Burkov V. N., Danev B., Enaleev A. K., et al. *Bol'shie sistemy: modelirovanie organizatsionnykh mekhanizmov* [Large systems: modeling of organizational mechanisms]. Ed. by Opytsev V. I. Moscow, Nauka Publ., 1989, 245 p.

2. Kutyskin A. V., Shulgin O. V. *Ispol'zovanie dinamicheskogo normativa dlya otsenki ekologicheskogo aspekta funktsionirovaniya regional'noy sistemy potrebitel'skogo vodopol'zovaniya* [The use of a dynamic standard to assess the environmental aspect of the functioning of the regional system of consumer water use]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 6 (95), pp. 108–116.

3. Fomina V. F., Fomin A. V. *Ekologo-ekonomicheskoe razvitie Respubliki Komi v aspekte «zelenogo» rosta* [The economic development of the Komi Republic in terms of “green” growth]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka – The North and the market: formation of economic order*, 2018, no. (57), pp. 85–98.

4. Andryukov B. G. *Mezhdunarodnye programmye strategii kompleksnogo issledovaniya vliyaniya okruzhayushchey sredy na zdorov'e* [International program strategies for a comprehensive study of the impact of the environment on health]. *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka – Health. Medical Ecology. Science*, 2015, no. 1 (59), pp. 4–14.

5. Smeets E., Weterings R. *Environmental Indicators: Typology and Overview. Report no. 25*. European Environment Agency Publ., Copenhagen, Denmark, 1999, 19 p.

6. Bardakhanova T. B., Munkueva V. D. *Ispol'zovanie DPSIR dlya sravneniya metodologicheskikh podkhodov k izmereniyu ekologo-ekonomicheskoy informatsii* [Using DPSIR to compare methodological approaches to measuring environmental-economic information]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment – Bulletin of the Buryat State University. Economics and Management*, 2020, no. 3, pp. 12–21.

7. Xie L., Yao Y., Dan Z., Shi F., Yuan Y., Fang L., Yuan W. Evaluation of provincial green development performance based on DPSIR model. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, no. 12 (5), pp. 1681–1686.

8. Zhou Y., Zhang Z., Yu W., Chen X., Jiang W., Xu Y. Evaluation and obstacle factors of the green development

level of China's oil and gas resource-based cities based on DPSIR-TOPSIS Model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2025, vol. 34 (2), pp. 1481–1493.

9. Xu J., Wang H., Li Z. Evaluation of the provincial carbon neutrality capacity of the middle and lower yellow river basin based on the entropy weight matter-element model. *Energies*, 2022, vol. 15 (20), 7600.

10. Tsztytsyan Ch., Kireeva M. S., Murzin A. D. *Metodika otsenki effektivnosti upravleniya razvitiem territoriy basseyna reki Khuankhe* [Methodology for assessing the effectiveness of development management of the Yellow River basin]. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy – Economy and ecology of territorial formations*, 2023, no. 7 (1), pp. 20–27.

11. Lu M., Wang X., Liao W., Wang C., Lei X., Wang H. Assessment of temporal and spatial dynamics of regional water resources security in the DPSIR Framework in Jiangxi Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (6), 3650.

12. Zhao M., Wei J., Han Y., Shi J., Wang S. Water resource security evaluation and barrier analysis in Henan Province utilizing the DPSIR framework. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, vol. 12, 1354175.

13. Jia Y., Wang H. Study on water resource carrying capacity of Zhengzhou City based on DPSIR model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20 (2), 1394.

14. Nadtoka T. B., Vinogradov A. G. *Mnogomernoe otsenivanie urovnya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya predpriyatiya* [Multidimensional assessment of the level of socio-economic development of the enterprise]. *Biznes Inform. – Business Information*, 2014, no. 1, pp. 184–191.

15. Gorbunov V. S., Shorokhov S. I. *Kak postroit' reyting? Postroyeniye reytinga regionov Rossii taksonometricheskim metodom* [How to build up rating? Building up rating of Russian regions by taxonomic method]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika – Regional Economics: Theory and Practice*, 2023, vol. 21, no. 6 (513), pp. 1006–1019.

16. Zhang Y., Wei Y., Mao Y. Sustainability assessment of regional water resources in China based on DPSIR model. *Sustainability*, 2023, vol. 15 (10), 8015.

17. Wu D., Liu M. Assessing adaptability of the water resource system to social-ecological systems in the Beijing-Tianjin-Hebei region: Based on the DPSIR-TOPSIS framework. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2022, vol. 20 (3), pp. 261–269.

18. Deng W., Li X., Guo Y., Huang J., Zhang L. Ecological assessment of water environment in Huizhou Region of China based on DPSIR theory and Entropy Weight TOPSIS model. *Water*, 2024, vol. 16 (18), 2579.

19. Li J., He W., Jiang E., Yuan L., Qu B., Degefu D. M., Ramsey T. S. Evaluation and prediction of water security

levels in Northwest China based on the DPSIR model. *Ecological Indicators*, 2024, vol. 163, 112045.

20. Bai Y., Qin J., Liu W., Li L., Wu Y., Zhang P. The DPSIR model-based on sustainability assessment of urban water resources: comparative study of Zhuhai and Macao. *Water*, 2024, vol. 16 (10), 1413.

21. Alferova T. V. *Teoretiko-metodologicheskij bazis izmereniya ustoychivogo razvitiya regional'nykh sistem* [Theoretic and methodological basis for measuring the sustainable development of regional systems]. *Vestnik Permskogo un-ta. Ser. «Ekonomika» – Bulletin of Perm University. Ser. "Economics"*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 304–320.