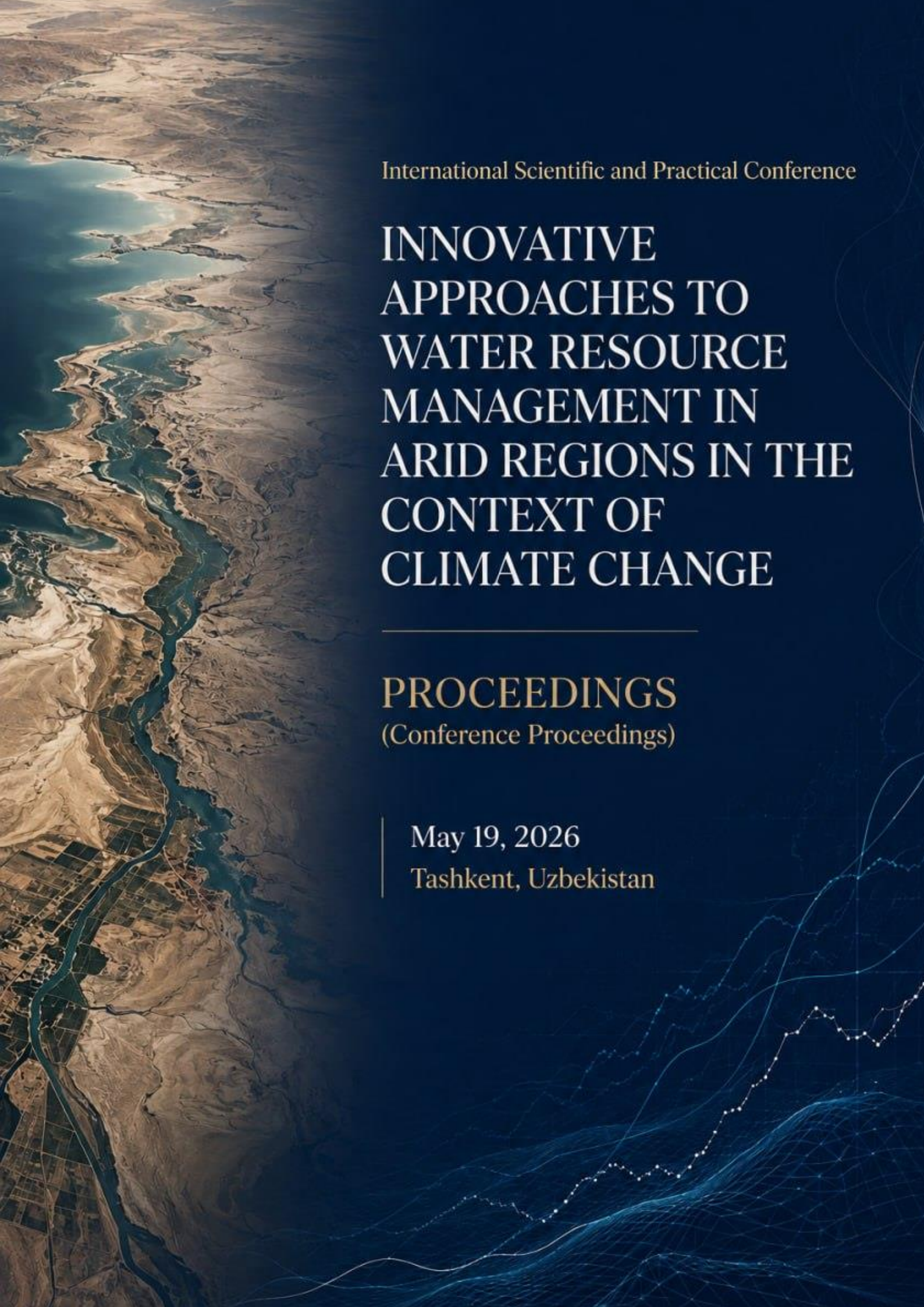


The background of the cover is a composite image. On the left, there is an aerial photograph of a river, likely the Syr Darya, flowing through a dry, brownish landscape. The river is a vibrant blue, contrasting with the arid surroundings. On the right side, there is a dark blue background with a white, glowing line graph or data visualization that trends upwards, symbolizing innovation or progress.

International Scientific and Practical Conference

INNOVATIVE APPROACHES TO WATER RESOURCE MANAGEMENT IN ARID REGIONS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

PROCEEDINGS
(Conference Proceedings)

May 19, 2026

Tashkent, Uzbekistan

UNIVERSITY OF WORLD ECONOMY AND
DIPLOMACY

International Scientific and Practical Conference

WICAR-2026

*Innovative Approaches to Water Resource Management
in Arid Regions in the Context of Climate Change*

PROCEEDINGS

(Conference Proceedings)

Tashkent, Uzbekistan • 2026

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

“INNOVATIVE APPROACHES TO WATER RESOURCE MANAGEMENT IN ARID REGIONS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE” WICAR-2026

International Program Committee:

Umarov A.A. — *Chairman, First Vice-Rector for Academic Affairs, UWED*
Dadabaev T. — *Vice-Rector for Research and Innovation, UWED*
Raimova G.M. — *Deputy Chair, Professor, Head of Department of SA and MM, UWED*
Rasulov A.S. — *Deputy Chair, Professor, UWED*
Seytov A.J. — *Deputy Chair, Professor, UWED*
Dalabaev U. — *Professor, UWED*
Umarova Sh. — *Dotsent, UWED*

Organizing Committee:

Djalalov M.M. — *Chairman, Vice-Rector for Digital Transformation and Economy, UWED*
Raimova G.M. — *Deputy Chair, Head of Dept. of System Analysis and Mathematical Modelling, UWED*
Seytov A.J. — *Deputy Chair, Professor, UWED*
Bakaev M. — *Professor, Rector of MGIMO*
Abdullaev E.E. — *Dean, UWED*
Dalabaev U. — *UWED*
Siddiqova M. — *UWED*
Umarova Sh. — *UWED*

Conference Secretariat:

Umarova Sh.G. (Head), Buriev A., Kasimova N.J., Maraimova K.Sh., Khasanova D.R., Yarashev I., Solaeva M., Mustafakulova A.Kh., Akabirkhodjaeva D.R.

The authors are solely responsible for the content and accuracy of their articles.

DOI: 10.5281/zenodo.20266789

Innovative Approaches to Water Resource Management in Arid Regions in the Context of Climate Change

The University of World Economy and Diplomacy (UWED) hosted the International Scientific and Practical Conference on May 19, 2026, in Tashkent, Uzbekistan. The conference aims to discuss key issues of effective water resource management in arid regions under climate change, develop innovative approaches and mathematical modeling methods, share research results and practical experience, and strengthen international academic cooperation in this field.

KEY THEMES OF THE CONFERENCE

1. Water Diplomacy and Integrated Approaches in International Relations

- Systemic analysis in international relations and water diplomacy
- Economic, environmental and energy aspects of sustainable development
- Systemic approaches to achieving the SDGs

2. Mathematical and Computer Modeling of Optimal Water Resources Management

- Optimal water resource management under climate change
- Modeling water resource dynamics and climate variability
- Applied and computational mathematics in irrigation system modeling

3. Environmental and Hydrogeological Processes in the Aral Sea Region

- Analysis of hydrogeological processes in the Aral Sea region
- AI, machine learning and big data for environmental challenges
- Simulation and stochastic modeling of eco-hydrological processes

Contact Information

Date: May 19, 2026

Web: <https://wicar.uwed.uz/>

Venue: UWED Conference Hall, 54 Mustaqillik Ave., Tashkent

Email: tmm.conf@uwed.uz

Phone: +998 90 985 80 44

Content – Mundarija – Содержание

1. <i>Abdujabar Rasulov, Gulnora Raimova</i>	11
Solution boundary value problem for Helmholtz equation in interaction between ground and soil water	
2. <i>Dalabaev Umurdin, Ikramova Malika, Umarova Shoir</i>	18
The influence of porous layer parameters on hydrodynamic characteristics in laminar flow	
3. <i>Хасанов Нозим Бахтиярович</i>	25
Роль водной дипломатии в предотвращении экологических проблем в центральной Азии	
4. <i>Nietbay Uteuliev, Gafur Djaykov, Sherzod Yadgarov</i>	30
Numerical modeling and optimization of water flow management in main irrigation canals based on the finite difference method	
5. <i>Хикматуллозода Н.Х., Гулахмадзода А.А., Иноятова К.А.</i>	35
Анализ деградации почвенного покрова в бассейне реки Кафарниган	
6. <i>Мурадов Шухрат Одилович</i>	38
Иқлим ўзгариши шароитида Ўзбекистоннинг арид ҳудудларида сув муаммоларини бартараф этиш стратегик ечимлар	
7. <i>Seytov Aybek Jumabayevich, Haydarova Roziya Davronovna</i>	45
Suv xo'jaligi obyektlaridagi suv resurslarini optimal boshqarish usulini aniqlashtirish	
8. <i>Zafar Abdujabborov, Nurbek Choriyrov, Olim Abduraxmonov</i>	50
Optimal management of unsteady water flow in large main canals using artificial intelligence: a case study of the Amu-Zang main canal	
9. <i>Zafar Abdujabborov, Nurbek Choriyrov, Olim Abduraxmonov, Aybek Seytov</i>	59
A hybrid hydrodynamic-machine learning framework for optimal control of unsteady flow in large irrigation canals	
10. <i>Т.Ахмедова</i>	67
Современное экологическое состояние поверхностных вод реки Ахангаран	
11. <i>D.Q.Jumamuratov, Z.T.Turlibaev</i>	72
Suv resurslarining ekologik holatini baholash va ularni boshqarishning samarali mexanizmlari	
12. <i>Shoir</i>	75
A Bathymetry-Independent Framework for Reconstructing Reservoir Operational Regimes from Satellite-Derived Surface Dynamics	
13. <i>Тлегенов Мархабай Толегенович</i>	86
Пространственно-временная динамика численности полуденной песчанки (meriones meridianus) в низовьях	

14. **Nematov Alisher, Madaminov Surojiddin, Amangeldiyev Denis, Taganov Eziz, Abdullajonov Akbarshox, Safar Mansurov** 91
Gidrotexnika inshootlarining loyqa cho'kindilar bilan to'lib borishini oldini olish bo'yicha innovatsion yechim va tavsiya
15. **Abdujabar Rasulov, Amirxan Yusupov** 95
Economic, environmental and energy aspects of sustainable development
16. **Abdujabar Rasulov, Komila Raxmonova** 102
Yashil investitsiyalarni baholashda xalqaro metodologiyalar: AQSh, EU, Janubiy Koreya va Xitoy tajribasini qiyosiy tahlil
17. **Abdujabar Rasulov, Sarvar Abdullayev** 107
Ecological Risk Management in International Tourism: Environmental Benchmarking and SDG Integration
18. **Mansurov Safar Rahmonqulovich, Almardanov Samandar Mengqobil o'g'li** 112
Suv havzalaridagi plastik va chiqindilarni yig'uvchi robot qurilmasi
19. **Буриев А.Т.** 118
Искусственный интеллект и информационные технологии в моделировании процессов автоматизации учебного процесса
20. **Буриев А.Т., Эркинов Б.О.** 122
Искусственный интеллект, машинное обучение и большие данные в исследовательских задачах: трансформация научного метода
21. **Choriyorov Nurbek, Seytov Aybek, Abdujabborov Zafar** 127
Diffuziv to'lqin modeli asosida suv sathini optimal boshqarishda machine learning algoritmlarining samaradorligi
22. **Сурия Тураева** 132
Водная дипломатия в центральной Азии: современные вызовы и перспективы регионального сотрудничества
23. **Sodikova Dilafruz Zokhid qizi** 140
Water security in arid zones: emerging technologies and adaptive management strategies under climate change
24. **Акабирходжаева Дилфуза Рустамовна** 145
Оптимизация структуры посевов как инструмент управления водными ресурсами в аридных зонах в условиях изменения климата
25. **Sabina Mardonova, Difuza Rustamovna Akabirkhodjaeva** 149
Implementing the water–energy–food (WEF) nexus approach to address water scarcity in central Asia
26. **M.N. Esonturdiyev** 154
Nasos stansiyalar ishini optimal boshqarish masalasini chekli ayirmalar usuli bilan yechish

-
- 27. M.N. Esonturdiyev, Z.Y. Abdurahimov** 159
Markaziy Osiyo davlatlarida suvi resurslarini optimal boshqarishning nazariy asoslari, yondashuvlari va modellari
- 28. Умарова Ш.Г., Уктамов М.У.** 165
Цифровизация экономики и устойчивость стран к глобальным кризисам: международный опыт и перспективы для Узбекистана
- 29. U.B. Boymirzayev, M.N. Esonturdiyev** 167
Markaziy Osiyo mamlakatlarida suv diplomatiyasi doirasida tizimli tahlil masalalari va muammolari
- 30. Saparov A.B., D.Q. Jumamuratov** 172
Methods of hydraulic calculations for improvement operation and design of irrigation canals with earthen channels
- 31. Baimanov Ruslan Kenesbaevich, Adenbayev Asenbay Sabitovich** 178
On The Question Of Calculating The Sedimentation (Siltation) Of Backed-Up Reaches Of Low-Head Dams
- 32. Хасанова Д., Буриев А., Собиржонова М.** 183
Применение системы maple для визуализации и численного моделирования задач курса calculus II
- 33. Хасанова Д.** 187
Развитие метода перемещаемых узлов для решения дифференциальных уравнений и прикладных задач
- 34. Далабаев У., Хасанова Д., Абилаева С.** 190
Сравнение метода перемещаемого узла и метода Монте-Карло при решении уравнения Блэка–Шоулза
- 35. Hokimjonova Zarnigora, Akabirkhodjaeva Dilfuza** 193
Integrated Hydro-Optimization and Simulation Frameworks for Resilient Water Governance in Hyper-Arid Environments
- 36. Seytimbetov Dauletyar Mambetyarovich, Allamuratova Nilufar Kuat qizi** 197
Suv taqsimotini avtomatlashtirishda gibrid (MPC+RL) yondashuv
- 37. Temirov Ahmadjon Javli o'g'li, Seytov Aybek Jumabayevich** 202
O'zbekistonda bank-moliya tizimining iqtisodiy rivojlanishda va kichik biznesni qo'llab-quvvatlashdagi o'rni
- 38. Dilshodbek Turobov, Safar Mansurov** 209
Suv va sel-suv omborlarining suv sathini nazorat qilishni avtomatlashtirish
- 39. Solayeva Mehribon Norimonovna** 214
Dinamik sistemalarning boshlang'ich tushunchalari (Qo'zg'almas nuqta haqidagi teorema va uning misollardagi tahlillari)
-

40. Solayeva Mehribon Norimonovna	217
Dinamik sistemalarning boshlang'ich tushunchalari (Qo'zg'almas nuqta haqidagi teoremaning dvriy nuqtalar uchun tadbiri va uning misollardagi tahlillari)	
41. Turdiyev Shodmon, Abdulhamidov Izzatbek	221
Iqtisodiy qaror qabul qilishda sonli optimallashtirish usullarining qo'llanilishi	
42. Umarova Shoira, Po'latov Olmosbek	225
Kichik va o'rta korxonalar uchun usd/uzs valyuta juftligi o'zgaruvchanligini garch va Monte-Karlo modellari yordamida baholash hamda xedjlash strategiyalarini asoslash	
43. Maraimova K.Sh	229
The trend of integrating the oil industry with renewable energy sources	
44. Murodov Sardor Niyozbek o'g'li	233
Zamonaviy AQSh–Xitoy munosabatlarida Tayvan omilining geosiyosiy ahamiyati	
45. Muxlisa Qambarova, Gulnora Mirvalievna Raimova	237
The Role of Weather Derivatives in Managing Energy Market Risks: Evidence from the U.S. Energy Sector	
46. Makhmudjanova Sayyora Yashin qizi	243
Quantum Interference and Semantic Vectors: Addressing Context Preservation in AI-Powered Machine Translation Systems	
47. Bekchanov Sultanbay Alisher o'g'li	248
Rossiya tashqi siyosatida "yumshoq kuch" omili: normativ-huquqiy va diskursiv tahlil	
48. Matyokub Bakoev	254
Deterministic and Stochastic Approaches to Water Pollution Modeling	
49. Kazakova Madina Allayar qizi	265
Sayoz suv tenglamalarini sonli usulda yechish	
. Акрам Очилов Омон угли	270
Политика Европейского Союза в Центральной Азии и Роль Узбекистана в Формировании Регионального Взаимодействия	

[DOI 10.5281/zenodo.20256871](https://doi.org/10.5281/zenodo.20256871)

Solution boundary value problem for Helmholtz equation in interaction between ground and soil water

Abdujabar Rasulov¹ and Gulnora Raimova¹

¹ University of World Economy and Diplomacy, 54 Mustakillik Ave., Tashkent 100007, Uzbekistan

Abstract. The Helmholtz equation, particularly used in hydrogeology to describe steady-state groundwater flow in leaky aquifers, where interaction between groundwater and soil water (or surface water) occurs. In this context, it models the exchange of water between a shallow aquifer and an overlying source (like surface water or infiltrating soil water). This work devoted to construct a probabilistic model for solving boundary value problems for the semi-linear Helmholtz equation. Probabilistic representations of problem solving in the form of the mathematical expectation of some random variable are obtained. In accordance with probabilistic representation, branching processes are constructed and modeling formulas are specified for each of the branching processes. It has been proven that the constructed branching processes degenerate with probability one and the average number of particles of each n -th generation is less than or equal to one. For the considered problems, unbiased estimates were constructed on the trajectories of the corresponding random processes. Unbiased estimates which constructed on the trajectories of a branching process with a limited average number of branches, easily modeled in computer and has limited variance. Based on the proposed estimates, computational experiments were carried out. The results of the computational experiment show that using the constructed algorithm it is possible to solve semi-linear problems that occur in practice.

1 Introduction

In the unsaturated zone water flow and solute transport occur mainly in the vertical direction. Once in the saturated zone, water starts to move in a three-dimensional pattern, following the prevailing pressure gradients. The bottom boundary of the one-dimensional Soil – Water – Atmosphere – Plant (SWAP) is either in the unsaturated zone or in the upper part of the saturated zone where the transition takes place to three-dimensional groundwater flow.

At the lower boundary we can define three types of conditions: - Dirichlet condition, the pressure head h is specified; - Neumann condition, the flux q is specified; - Cauchy condition, the flux depends on the groundwater level.

The *Dirichlet* condition is a prescribed pressure head, often as a recorded phreatic surface of a present groundwater table.

The *Neumann* condition is usually applied when a no-flow boundary (e.g. an impermeable layer) can be identified, or in case of a deep groundwater table, resulting in free drainage. The *Cauchy* condition is used when unsaturated flow models are combined with models for regional groundwater flow or when effects of surface water management are to be simulated. The relation between flux and groundwater level can be obtained from drainage formulae and/or from regional groundwater flow models.

The interaction between groundwater and soil water (unsaturated zone) is typically governed by the Richards equation (for unsaturated flow) and Darcy-based flow equations, rather than a direct Helmholtz equation. However, the Helmholtz equation arises in specialized scenarios within subsurface hydrology, particularly in modeling steady-state flow in layered systems with vertical leakage or in the analytical solution of phreatic aquifers with surface recharge.

While the Laplace equation describes steady flow in aquifers with no vertical leakage, the Helmholtz equation arises when there is a linear coupling between the horizontal flow and a vertical flux (such as soil water drainage or leakage from a confining layer).

In this work we will study a probabilistic representation of the solution boundary value problem for the quasi linear Helmholtz equation

$$-\Delta u(x) + cu(x) = f(u), \quad x \in D, \quad u|_{\Gamma} = \varphi \quad (1)$$

where, $f(u)$ in our case could be a function $\exp(u)$, $\sin(u)$ or $\cos(u)$. About some review and existents of the solution semi-linear elliptic boundary value problem was written in the paper [1,2]. Under the assumption of the existence of a solution, an unbiased estimator is constructed on the trajectories of the proposed branching process "walk on spheres". To do this, using Green's formula, a special integral equation is written that connects the value of the function with its integrals over a ball and a sphere of maximum radius centered at a point and entirely contained in the region under consideration. It is proved that under certain conditions there exists a fixed point for the nonlinear integral operator corresponding to the integral equation. In this case, the iteration process method converges and classical Monte Carlo methods could be used. A probabilistic representation of the solution of the problem in the form of the mathematical expectation of some random variable is obtained. In accordance with the probabilistic representation, a branching process of walk on spheres is constructed and an unbiased estimator of the solution of the problem with finite variance is constructed on its trajectories. Recently appeared several papers devoted to above mentioned problems [3-5,16-18].

2. Formulation of the problem

First of all, let us present some well-known results from [6], for the solution of the Dirichlet problem in the three-dimensional case for the linear Helmholtz equation $\Delta u - cu = -f$, where $c > 0$. The function $f(x)$ satisfies the Golder condition in the domain D bounded by the regular boundary Γ , on which the boundary condition $u|_{\Gamma} = \varphi(x)$ is given:

$$\Delta u(x) - cu(x) = -f, \quad x \in D, \quad u|_{\Gamma} = \varphi \quad (2)$$

Let's introduce the notation: $\bar{D}$ - closure of the region D ; function $d(x) = \min_{y \in \Gamma} |x - y|$ is the distance from the point x to the boundary Γ ; $\Gamma_{\varepsilon} = \{x \in \bar{D} : d(x) < \varepsilon\}$, ε - neighborhood of Γ ; the sphere $S(x)$ is the largest of the spheres centered at the point x that lie entirely in $\bar{D}$, i.e. $S(x) = \{y \in \bar{D} : |y - x| = d(x)\}$. Let it be necessary to estimate the solution $u(x_0)$ of the stated problem at a given point $x_0 \in D$. It is known from the theory of fundamental solutions [4] that $u(x_0)$ can be represented as

$$u(x_0) = \frac{d_0 \sqrt{c}}{4\pi d_0^2 \operatorname{sh}(d_0 \sqrt{c})} \int_{S(x_0)} u(s) ds + \int_{|x-x_0| < d_0} \frac{\operatorname{sh}[(d_0 - |x - x_0|)\sqrt{c}]}{4\pi |x - x_0| \operatorname{sh}(d_0 \sqrt{c})} f(x) dx \quad (3)$$

where $d_0 = d(x_0)$. The relation (2) must be supplemented with the following equality, which takes into account the boundary condition of the problem:

$$u(x_0) = \varphi(x_0), \quad x_0 \in \Gamma \quad (4)$$

For the function $u(x)$, we can write the following integral equation:

$$u(x) = \int_{\Gamma} k(x, y) u(y) dy + \phi(y), \quad (5)$$

where

$$k(x, y) = \begin{cases} \frac{d\sqrt{c}}{\text{sh}(d\sqrt{c})} \delta_r(y), & x \notin \Gamma_\varepsilon, \\ 0, & x \in \Gamma_\varepsilon, \end{cases}$$

$$\phi(x) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \int_{|x-y|<d} \frac{\text{sh}[(d-|x-y|)\sqrt{c}]}{|x-y| \text{sh}(d\sqrt{c})} f(y) d(y), & x \notin \Gamma_\varepsilon \\ u(x), & x \in \Gamma_\varepsilon \end{cases}$$

Here $d = d(x)$, $\delta_r(y)$ is the generalized density corresponding to the uniform probability distribution on the sphere $S(x)$. The probabilistic approach to solving the problem is associated with the Markov chain, which is called a walk-in sphere or a spherical process.

We will consider a probabilistic approach to solving the problem (2,4) in the special case $f(x) = f(u)$ which is mentioned in (1). Recently, new works have appeared devoted to solving this kind of boundary value problems using the Monte Carlo method [7,8].

3. Probabilistic representation construction of an unbiased estimators of the solutions

Applying the equation (3) to the equation $-\Delta u(x) + cu(x) = f(u)$ in (1) we get the following integral representation:

$$u(x) = \frac{R\sqrt{c}}{4\pi R^2 \text{sh}(R\sqrt{c})} \int_{S_R} u(y) dy + \int_{K_R} \frac{\text{sh}[(R-|x-y|)\sqrt{c}]}{4\pi|x-y|\text{sh}(R\sqrt{c})} f(u(y)) dy \quad (6)$$

Here $R(x) = \min_{y \in \Gamma} |x-y|$ is the distance from the point x to the boundary, K_R is the ball of radius R centered at the point x , S_R - corresponding sphere. The first integral in (6) is the integral over the surface of the sphere S_R . Since the surface area of the sphere S_R is equal to $4\pi R^2$, after introducing this expression under the sign of the first integral, it will represent a uniform distribution on the sphere:

$$u(x) = \frac{R\sqrt{c}}{\text{sh}(R\sqrt{c})} \int_{S_R} u(x + R\omega) d\omega + \frac{\text{sh}(R\sqrt{c}) - R\sqrt{c}}{\text{sh}(R\sqrt{c})} \int_{K_R} \frac{\text{sh}[(R-|x-y|)\sqrt{c}]}{4\pi|x-y|(\text{sh}(R\sqrt{c}) - R\sqrt{c})} \cdot \frac{f(u(y))}{c} dy$$

Let's rewrite this expression as follows

$$u(x) = q \int_{S_R} u(y) d\omega + (1-q) \int_{K_R} p(x, y) \frac{f(u(y))}{c} dy \quad (7)$$

the following notation was used here: $q = \frac{R\sqrt{c}}{\text{sh}(R\sqrt{c})}$, ω is the uniform distribution on S_R ,

$$p(x, y) = \frac{\text{sh}[(R-|x-y|)\sqrt{c}]}{4\pi|x-y|(\text{sh}(R\sqrt{c}) - R\sqrt{c})}$$

transition density from x to $y(x, y \in K_R)$. Let D is bounded domain in R^3 with regular border Γ , $f(x, u) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x) u^n(x)$, where coefficients satisfy the conditions $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\bar{a}_n} = 0$, where $\sup_{x \in \bar{D}} |a_n(x)| \leq \bar{a}_n$ and $\sum_{n=0}^{\infty} \bar{a}_n n < \infty$. Suppose $\varphi(x) \in C(\bar{F})$, $a_n(x) \in C(\bar{D})$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) and $c > 0$. In this case there are exist [8] the only continuous solutions of semi-linear problem (1). Using this assertion, the equation (7) will be in the form

$$u(x) = q \int_{S_R(x)} u(y) d\omega + (1-q) \int_{K_R(x)} p(x, y) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n(y)}{c} u^n(y) dy. \quad (8)$$

In accordance with (8), it is natural to construct unbiased estimates for solving problem (1) on the trajectories of the process of walk on spheres with branching, in which particles of the same type.

When using Monte Carlo methods, the convergence of the iteration method for the problems under consideration is assumed. Let us define the conditions under which the nonlinear integral operator corresponding to the probabilistic representation (8) and defined below is a compression operator and thus has a fixed point (for fixed points for nonlinear operators, see, for example, [9-11]). Let us define the operators $\mathfrak{R}_1$ and $\mathfrak{R}_2$ acting on the functions from $C(\bar{D})$ by the formulas:

$$\mathfrak{R}_1 u(x) = \int_{\bar{D}} \frac{u(y)}{4\pi R^2} I_{S_R(x)}(y) d\mu(y), \quad (x) \in \bar{D};$$

$$\mathfrak{R}_2 u(x) = \int_{\bar{D}} p(x, y) u(y) I_{K_R(x)}(y) d\mu(y), \quad (x) \in \bar{D};$$

Here the measure μ - is defined on σ - the algebra of Borel subsets $\bar{D}$ by the equality $\mu(A) = \lambda(A) + S(A \cap \Gamma)$, λ - the Lebesgue measure in R^3 , S - the surface area. Note that for fixed x the following integrals are equal to one:

$$\int_{\bar{D}} \frac{1}{4\pi R^2} I_{S_R(x)}(y) d\mu(y) = 1, \quad \int_{\bar{D}} p(x, y) I_{K_R(x)}(y) d\mu(y) = 1.$$

Let's consider a nonlinear integral operator F mapping in $B \subset C(\bar{D})$ to $C(\bar{D})$:

$$Fu(x) = q(x)\mathfrak{R}_1 u(x) + \frac{(1-q(x))}{c} \sum_{n=0}^{\infty} \mathfrak{R}_2(a_n(x)u^n(x)),$$

which has a Fréchet derivative at every point of $B_0 \subset B$ a convex closed set. Recall that for the nonlinear operator F :

$Fv(x) = \int_{\bar{B}} K(x, y)g(v(y), y)dy$ the Fréchet derivative at a point is determined by the equality [8], $F'(v)u = \int_{\bar{B}} K(x, y)g'_v(v(y), y)u(y)dy$.

In the next theorem, we define the conditions imposed on the coefficients that ensure the convergence of the iterative method for the integral equation $u(x) = Fu(x)$ corresponding to the probabilistic representation (8).

Theorem 1. Let $B_0 = \{v: \|v\| < 1\}$ and $M = \sum_{n=1}^{\infty} n \bar{a}_n < c$. Then the operator F is a compression operator, i.e., $\|Fu - Fv\| \leq q_0 \|u - v\|$, $(u, v \in B_0)$, $q_0 < 1$, and iteration method for any initial element $u_0 \in B_0$ converge to a unique solution $u(x)$ to the equation $u(x) = Fu(x)$.

Proof. Let it be $B \subset C(\bar{D})$ and $q_0 = \sup_{v \in B_0} \|F'(v)\|$. As is known from [7], the operator is a compression operator and therefore, there is a fixed point, that is, which is a solution to the integral equation (7). In this case, the value $u(x)$ can be obtained as the limit of the iteration sequence $\{u_n(x)\}$, here $u_{n+1}(x) = Fu_n(x)$, where $u_0(x)$ is an arbitrary element of B_0 . Let's define a subset $B_0 \in B$, where $q_0 < 1$. The Fréchet derivative of a nonlinear operator F at a point is defined as follows:

$$\begin{aligned} F'(v)u &= q(x)\mathfrak{R}'_1(v)u + \frac{(1-q(x))}{c} \sum_{n=0}^{\infty} \mathfrak{R}'_{2n}(v)u = q(x) \int_{\bar{D}} \frac{u(y)}{4\pi R^2} I_{S_R(x)}(y) d\mu(y) + \\ &+ \frac{(1-q(x))}{c} \sum_{m=0}^{\infty} n \int_{\bar{D}} p(x, y) a_n(y) v^{n-1} u(y) I_{K_R(x)}(y) d\mu(y). \end{aligned}$$

Here

$$\mathfrak{R}_{2n}(u) = \mathfrak{R}_2(a_n(x, t)u^n(x, t)) = \iint_{\bar{D}} p(x, y) a_n(y, \tau) u^n(y, \tau) d\mu(y).$$

Let us estimate the norm of the derivative. From the properties of the norms it follows:

$$\begin{aligned}\|F'(v)\| &\leq q(x)\|\mathfrak{R}'_1(v)\| + \frac{(1-q(x))}{c} \sum_{n=1}^{\infty} \|\mathfrak{R}'_{2n}(v)\| \leq \\ &\leq q(x)\|\mathfrak{R}_1\| + \frac{(1-q(x))}{c} \sum_{n=0}^{\infty} n \bar{a}_n \|\mathfrak{R}_2\| \|v\|^{n-1}\end{aligned}$$

Due to conditions $B_0 = \{v: \|v\| < 1\}$ and $M = \sum_{n=1}^{\infty} n \bar{a}_n < c$, we have $q_0 = \sup_{v \in B_0} \|F'(v)\| < 1$, and the theorem has been proven.

If the conditions of the theorem are satisfied, for solution to the nonlinear integral equation, which we will further evaluate, we could apply the method of statistical modeling.

Let's get started to construct a random branching process consistent with a probabilistic representation. For these purposes in accordance with representation (8), we construct a walk on sphere process with branching in the phase space D , in which particles of the same type participate.

Let $M = \sum_{n=1}^{\infty} n \bar{a}_n$ and $0 < \alpha < 1$. At the initial moment there is one particle at point $x_0 = x$. Let it be known $n > 0$ and x_n . For a unit of time, the particle with probability $q = \frac{R\sqrt{c}}{\text{sh}(R\sqrt{c})}$ goes to a point

x_{n+1} uniformly distributed on the sphere $S_R(x)$ and with probability $1 - q$ goes to a point x_{n+1} , distributed in the ball $K_R(x)$ with density $p(x, y)$. In the second case with the probability $\pi_n = \frac{\alpha}{M} \bar{a}_n$ ($n = 1, 2, \dots$) a particle is divided into n new particles or with the probability $\pi_0 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \pi_n$ absorbed. The new particles behave independently of each other in a similar way to the particle under consideration. The process ends if all particles died out in $\bar{D}$, or if all particles fall into the Γ . The parameter α allows you to adjust the number of branches.

Now we will construct Monte Carlo estimators for the problem (1), when the process of walk on spheres with branching from the point $x_0 = x$ is implemented, i.e. at the beginning there is one particle at the point x . Per unit time, the particle with probability $q = \frac{R\sqrt{c}}{\text{sh}(R\sqrt{c})}$ passes to the point $x_1 = y_1$, which is chosen uniformly over the sphere $S_R(x)$ and with probability $1 - q$ to the point $x_1 = y_2$, which is chosen inside the ball $K_R(x)$ according to the density $p(x, y)$. In the second case, branching will occur with probability π_n ($n \neq 0$), i.e. the particle is divided into n particles and the estimator is multiplied by $W = \frac{M a_n(x_1)}{c \bar{a}_n \alpha}$. In the case of $n = 0$, the particle is absorbed at the point x_1 and the estimator is multiplied by $\frac{a_0(x_1)}{c \pi_0}$. Further an independent walk of trajectories is constructed from the point x_1 . The new particles behave independently of each other in a similar way to the considered particle. The process terminates either if all particles in $\bar{D}$ die, or if all particles reach the ε neighborhood of the boundary.

Let us define an estimator in a recursive way. Let $\zeta_0(x) = u(x)$, $\zeta_k(x) = \Psi(\zeta_{k-1}(x))$, where

$$\Psi(\zeta(x)) = \begin{cases} \zeta(y_1), & \text{with probability } q(x) \\ W \cdot \prod_{i=1}^n \zeta^{(i)}(y_2), & \text{with probability } (1 - q(x))\pi_n, n \neq 0 \\ W_0, & \text{with probability } (1 - q(x))\pi_0 \end{cases}$$

Here $\zeta^{(i)}(y)$ are independent realizations of the random variable $\zeta(y)$. Let $\mathfrak{R}_k$ be the σ -algebra generated by the sequences $\{\omega_i\}_{i=0}^{k-1}, \{\alpha_i^0\}_{i=0}^{k-1}, \{\alpha_i^1\}_{i=0}^{k-1}, \{\alpha_i^2\}_{i=0}^{k-1}$. The following assertion is true.

Theorem 2. The sequence $\{\zeta_k(x)\}_{k=0}^{\infty}$ forms a martingale with respect to $\{\mathfrak{R}_k\}_{k=0}^{\infty}$. If $M < c$, then $\zeta_k(x, t)$ is a uniformly integrable martingale.

Proof. It is obvious from the definition of $\mathfrak{R}_k$ that $\zeta_k(x)$ is $\mathfrak{R}_k$ -measurable. From the properties of conditional mathematical expectations, it follows that:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\zeta_{n+1}(x)/\mathfrak{R}_n) &= \mathbf{E}(\Psi(\zeta_n(x))/\mathfrak{R}_n) = q(x)\mathbf{E}(\zeta_n(y_1)/\mathfrak{R}_n) + \\ &+ (1-q(x)) \sum_{i=1}^{\infty} \pi_n \mathbf{E} \left(W \cdot \prod_{j=1}^i \zeta_n^{(j)}(y_2)/\mathfrak{R}_n \right) + (1-q(x))\pi_0 \mathbf{E}(W_0/\mathfrak{R}_n) \end{aligned}$$

In view of the validity of the probabilistic representation (8) we get:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\zeta_{n+1}(x)/\mathfrak{R}_n) &= q(x) \int_{S_R(x)} \zeta_n(y) d\omega + \\ &+ (1-q(x)) \int_{K_R(x)} p(x,y) \left[\sum_{i=1}^{\infty} \pi_n \frac{M a_n(y)}{c \bar{a}_n \alpha} \zeta_n^i(y) + \pi_0 \frac{g}{c \pi_0} \right] = \zeta_n(x) \end{aligned}$$

Thus, the sequence $\{\zeta_k(x)\}_{k=0}^{\infty}$ forms a martingale with respect to $\{\mathfrak{R}_k\}_{k=0}^{\infty}$. To prove the uniform integrability of $\zeta_k(x)$, it suffices to show that $|\zeta_k(x)| \leq C$, ($C = \text{const}$). Since the parameter α is chosen from the condition $\frac{M}{c} \leq \alpha < 1$. Since $u(x) \in C(\bar{D}) \cap C^2(\bar{D})$ and $\bar{D}$ is a bounded domain, then $|u(x)| \leq \text{const}$ for $(x) \in \bar{D}$. Further, under the conditions of the theorem, $|W_n(y)| = \left| \frac{M a_n(y)}{c \bar{a}_n \alpha} \right| \leq 1$, and hence $|\zeta_n(x)| \leq C < \infty$, ($C = \text{const}$). Hence it follows that the sequence $\{\zeta_n(x, t)\}$ is uniformly integrable. The theorem has been proven.

In order to reduce the time of obtaining one implementation of the estimator for the solution of problem (1), we consider a slightly modified process with a smaller number of branches and estimates on it with an arbitrarily small bias. Let us take ε -small enough and consider the inner ε -neighborhood of the boundary: Γ_ε . Let N_1 be the moment of termination of the process inside the region, and N_ε be the moment of the first hit of all particles in Γ_ε . $N = \min\{N_1, N_\varepsilon\}$ process stop time. Then the probability of breaking the trajectory at the point x_n will be equal to:

$$g(x_n) = \begin{cases} 1, & x_n \in \Gamma_\varepsilon \\ (1-q(x_{n-1}))\pi_0, & x_n \in \bar{D} \setminus \Gamma_\varepsilon \end{cases}$$

From the above conditions it is easy to show, that $N < \infty$.

Theorem 3. If $M < c$, then $\zeta_N(x)$ is an unbiased estimator for $u(x)$ with finite variance.

Proof. Since $\zeta_n(x)$ is a uniformly integrable martingale and N is a Markov moment, then according to Doob's free choice transformation theorem [12] for the martingale $\{\zeta_k(x)\}_{k=0}^{\infty}$, we get $\mathbf{E}\zeta_N(x) = \mathbf{E}\zeta_1(x)$. From the definition of $\zeta_1(x)$ and the probabilistic representation (8) it follows that

$$\mathbf{E}(\zeta_1(x)) = q(x)\mathbf{E}u(y_1) + (1-q(x))\mathbf{E}f(y_2, u(y_2))/c = u(x)$$

By consequence of the conditions of Theorem 2, $\mathbf{E}(\zeta_N(x))^2 < \infty$ and hence its variance is finite. The theorem has been proven. It should be noted that all obtained results could be extended to the Semi-Linear Neumann Boundary Value Problems [see:13,14].

Next, from $\zeta_N(x)$ a biased but practically realizable estimator $\zeta_N^*(x)$ is constructed in the standard way. Let x^* be the boundary point closest to $x\Gamma$. $\zeta_N^*(x)$ is obtained by replacing $u(x_N)$ in $\zeta_N(x)$ with $\varphi(x_N^*)$. Let us estimate the displacement $\zeta_N^*(x)$. It's clear that $|\mathbf{E}\zeta_N^*(x) - u(x)| \leq \mathbf{E}|\zeta_N^*(x) - \zeta_N(x)|$. If $N = N_1$, then $T_N = \{\emptyset\}$ and the process terminates without hitting Γ_ε . In this case $\zeta_N^*(x) = \zeta_N(x)$ and the offset is zero. If $N = N_\varepsilon$, then $Z_N = (x_N^1, n_N^1; x_N^2, n_N^2; \dots; x_N^k, n_N^k)$, where $x_N^i \in \Gamma_\varepsilon, i = 1, 2, \dots, k$ and the number k does not depend on N . Given that $|W_n(y)| \leq 1$ for arbitrary n and $y \in \bar{D}$, we have

$$\zeta_N^*(x) - \zeta_N(x) \leq \left(\prod_{i=1}^k [\varphi(x_N^i)]^{n_N^i} - \prod_{i=1}^k [u(x_N^i)]^{n_N^i} \right)$$

Let $L(\varepsilon)$ be the modulus of continuity of the function $u(x)$; then

$$|\mathbf{E}\zeta_N^*(x) - u(x)| \leq L(\varepsilon)\mathbf{E}(n_N^1 + n_N^2 + \dots + n_N^k).$$

Considering that the average number of particles in the N th generation

$$E(n_N^1 + n_N^2 + \dots + n_N^k) \leq K^N < 1$$

we find that the bias does not exceed $L(\varepsilon)$. The finiteness of the variance $\zeta_N^*(x)$ follows from $|W_n(y)| \leq 1$.

5. Conclusion

In this work we proposed Monte Carlo algorithms for the solution of the interior Dirichlet boundary value problem for the Helmholtz operator with a polynomial nonlinearity on the right-hand side.

Partial differential equations and Monte Carlo method, which have been used to model many phenomena in the natural sciences and engineering. In some cases, our method could be applied in the area reaction diffusion equations, homogenization of PDEs, stochastic dynamics, interacting particle systems, non-linear Poisson-Boltzmann equations, electrostatics in bio-molecular structure and dynamics and etc. Some last applications this method to the heat conductivity problems with quadratic nonlinearity was in paper [14].

The preliminary results of on computational experiment show, that with the discussed algorithms we can obtain practically efficient estimators. The parameter, which is used in calculating the probabilities of the branching, gives us the opportunity to control the average quantity of branches and the average number of the particles in the constructed tree. Thus, the estimators were constructed on trees with a minimal number of branches. In our approach we have used an estimator via absorption. In the future we could built an estimator via collision and hope will get a new result. The results of numerical experiments and applications to concert problems we are going to give in our next publications.

References

- [1] Bear, J. and A.H.D. Cheng. 2010. Modeling groundwater flow and contaminant transport. Springer.
- [2]. Ghanmi A., Alzumi H., Zeddini N., A sub-super solution method to continuous weak solutions for a semi-linear elliptic boundary value problem on bounded and unbounded domains. Electronic Research Archive, 2024, 32(6): 3742-3757. Doi: 10.3934/era.2024170
- [3]. Ermakov S.M., Pogosian A.A., On solving stochastic differential equations, Monte Carlo Methods and Applications, 2019, v.25, № 2, p.155-161.
- [4]. Ermakov S. M., Surovikina T. O., Inverse iterations in providing integral models with polynomial nonlinearity. Bulletin of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy 9 (67), no. 1, 23–36 (2022), <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.103>
- [5]. Ermakov S. M., Smilovitsky M. G., On the Monte Carlo method for solving large systems of linear ordinary differential equations. Bulletin of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy 8 (66), no. 1, 37-48 (2021), <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.104>
- [6]. Elepov B.S., Mikhailov G.A., Algorithm of "walk on spheres" for the equation // Doklady mathematics, Moscow, 1973. - T.212, No. 1. pp.15-18.
- [7]. Rasulov A.S., Monte Carlo algorithms for the solution Quasi-Linear Dirichlet boundary value problems of elliptical type, Mathematics and Statistics 11(3), 592-597 (2023). <https://www.doi.org/10.13189/ms.2023.110317>
- [9]. Rasulov A, Raimova G, Bakoev M., Solution of some semi-linear Dirichlet problem by Monte Carlo method, 2020, AIP Conference Proceedings, <https://doi.org/10.1063/5.0026724>
- [10]. Friedman A., Partial Differential Equations of Parabolic Type, Dover Publications, 2008, p. 368
- [11]. Sipin A.S., Solution of two Dirichlet boundary value problems by the Monte Carlo method, Computational Mathematics and Mathematical Physics, Moscow, 1979. - V.19, No.2. pp.388-401.

- [12]. Mikhailov G.A., Solving the Dirichlet problem for nonlinear elliptic equations by the Monte Carlo method// Siberian Mathematical Journal - Novosibirsk, 1994. - T.35, No. 5. pp.1085-1093.
- [13]. Shiryayev A.N., Probability, Springer New York, NY, 1996, p. 624.
- [14]. Simonov N.A., Algorithms for random walk over spheres for solving a mixed boundary value problem and the Neumann problem// Numerical Analysis and Applications, Novosibirsk, 2007. - T. 10, No.2, pp. 209-220.
- [15]. Rasulov A.S., In the book Recent Advances in Monte Carlo Methods, A New Monte Carlo Approach for the Solution of Semi-Linear Neumann Boundary Value Problem, 2024, Intech open, DOI: 10.5772/intechopen.1002452
- [16]. Rasulov A., Raimova G., Hasanova D., Monte Carlo solution of heat conductivity problems with quadratic nonlinearity on the boundary of domain. E3S Web of Conferences ETESD-II 2023 02, 060 (2023), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344306002>
- [17]. Haoyu L., Russer J. A., Wenquan C. and Russer P., A Monte Carlo method approach for the solution of the Helmholtz equation, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, China, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/APMC.2015.7413522.
- [18]. Kraszewski M., Plucinski J., Application of the Monte Carlo algorithm for solving volume integral equation in light scattering simulations, Optica Applicata, Vol. L, No. 1, 2020, DOI: 10.37190/oa200101
- [19]. Ma D., Zhang Z., A quasi Monte Carlo-based model reduction method for solving Helmholtz equation in random media, Communications on Analysis and Computation, 2023, Volume 1, Issue 3: 297-320. Doi: 10.3934/cac.2023015

[DOI 10.5281/zenodo.20177693](https://doi.org/10.5281/zenodo.20177693)

The influence of porous layer parameters on hydrodynamic characteristics in laminar flow

Dalabaev Umuridin¹, Ikramova Malika², Umarova Shoirat¹

¹University of World Economy and Diplomacy

²Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Uzbekistan

Email: udalabaev@uwed.uz.

Abstract

This paper presents the interaction of a laminar boundary layer with an adjacent porous substrate, focusing on the mechanisms of friction modulation at the interface. We analyze the influence of key structural parameters, including porosity and layer thickness, on the velocity profile and the drag coefficient due to the porous layer. The process is modeled using the Navier-Stokes equation, taking the porous layer into account, i.e., a single-domain approach is used. The results show that optimized porous coatings can significantly reduce wall shear stress, offering a promising approach for passive flow control in aerodynamic applications.

Keywords: Impact of Porous Layer Parameters on Wall Shear Stress in Laminar Boundary Layer Flows

Introduction

In many environmental and technical processes, porous media play a central role in the control of laminar flow. In hydrodynamic processes, fluid flows interact with heterogeneous porous media. A heterogeneous medium is a combined region containing a free zone and a porous layer. Examples include fluid flow in canals and rivers in the presence of sediments, flow with vegetation, flow with

an uneven bottom, flow through a silt layer containing a porous medium, etc. The study of the laws of continuous media flow through a heterogeneous layer is one of the areas of research in the field of multiphase media mechanics [1]. Прикладные задачи возникают в различных исследованиях геологических систем, относящихся к добыче полезных ископаемых, их очистке и переработке [2, 3]. Здесь имеет место трудности в создания математических моделей из-за сложности явлений [4]. С одной стороны, течение в свободной зоне описывается уравнениями Навье-Стокса, в пористой среды используется осреднённые уравнения [5].

There are two main classical approaches to describing such problems [6, 7]. The first approach models the medium using a single equation, and performs calculations using end-to-end computations. The second approach uses a separate equation for each medium, and performs calculations separately for each subdomain, with different interphase boundary conditions applied to the interboundary zone. This paper considers a model based on generalized Navier-Stokes equations. These equations are obtained by averaging over a characteristic volume of the porous medium and are written for the entire computational domain. For the numerical implementation of this model, a calculation algorithm based on the control volume method has been developed [8].

In [9-11], an interpenetrating model was used to study flows with porous media. The authors of [12-13] successfully applied the control volume method to numerically solve the Navier-Stokes equation, taking into account the rotation of a cylinder in a viscous flow. Work [14] is devoted to modeling flows with porous media using the viscous shallow water equation. Works [15-16] are devoted to modeling water processes for open flow (Saint-Venant equations) and numerical implementation.

Mathematical model and numerical method

Let us consider the Navier-Stokes equation with an additional term, describing the flow of a porous layer [6-7]. Then the flow of the liquid phase is described by a system of equations (two-dimensional case):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - Cu, \quad (1)$$

$$u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \vartheta \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) - C\vartheta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Here, u, ϑ are the longitudinal and transverse flow velocities, p is the pressure, ν is the climatic viscosity, and C is the interaction coefficient associated with the Darcy forces. The following equations are found in the literature: $C = f\mu/k$, f is the porosity of the medium, μ is the dynamic viscosity, and k is the permeability of the porous medium (determines the ability of a fluid to penetrate into a porous material. High permeability usually increases friction by entraining the flow inside) associated with the Kozeny-Karman formula, and is associated with

$$k = \frac{d^2 f^3}{150(1-f)^2}$$

Let us reduce equations (1)-(3) to dimensionless form.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{Re} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - Ku, \quad (4)$$

$$u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \vartheta \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = -\frac{1}{Re} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) - K \vartheta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Here $Re = hU\rho_0/\mu$ is the Reynolds number; U is the characteristic velocity; h is the characteristic size, the dimensionless coefficient K has the following value: is the Reynolds number; U is the characteristic velocity; h is the characteristic size, the dimensionless coefficient K has the following value:

$$K = \left(\frac{h}{d}\right)^2 \frac{150(1-f)}{f^3 \cdot Re}$$

Dimensionless variables are related to dimensional variables as follows (here variables with primes are dimensional):

$$x = \frac{x'}{h}, y = \frac{y'}{h}, u = \frac{u'}{U}, v = \frac{v'}{U}, p = \frac{h^2 \rho U}{\mu} p'$$

Equations (4)-(6) allow us to study the flow of fluid both from inside and outside a porous medium, since at $f = 1$ we obtain the Navier-Stokes equations for an incompressible fluid, at $f \neq 1$ the Navier-Stokes filtration equations, and these equations are suitable for the entire region under consideration.

The flow region is shown in Fig. 1.

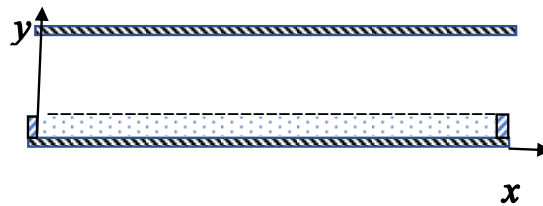


Fig. 1 Flow region

The channel height is h , the lower part of which, with a height of δ , is filled with a porous medium. Our goal is to determine the influence of flow parameters and the porous layer on the flow hydrodynamics and the influence on the drag coefficient at the interface.

For the purpose of numerically solving the system of differential equations (4)–(6), the control volume method was chosen [8].

Discretization of the equations was performed by integration over control volumes, followed by approximation of the flows through the cell faces. To relate velocity and pressure, the SIMPLE algorithm [8] was used, generalized to the system of equations (4)–(6), including terms responsible for the influence of the porous medium. At each iteration, discrete equations were solved for the velocity components (and other unknowns, if present in (4)–(6)), after which the pressure and velocity were corrected from the pressure correction equation, ensuring that the continuity equation was satisfied. Convergence was monitored by the residuals of the equations and by the stabilization of integral characteristics (e.g., flow rate and pressure drop/drag coefficient).

It should be noted that equations of type (4)–(6) are widely used to describe flows in the presence of porous inclusions and porous layers; similar formulations were used to study the flow structure in [5]. This allows us to compare the obtained results with known approaches and, if necessary, verify them against published data.

Boundary conditions were specified as follows. A no-slip condition (zero velocity at the wall) was used on the solid walls of the computational domain. At the channel inlet, a hydrostatic pressure distribution and a velocity profile corresponding to Poiseuille flow were specified, ensuring correct initialization of the inlet flow and reducing the influence of the inlet region on the studied region. At the outlet, a "soft" boundary condition was applied, minimizing the artificial influence of the boundary on the flow (e.g., zero longitudinal gradients for velocities and/or a fixed reference pressure).

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0.$$

Results and discussions

To analyze the obtained solutions to the problem, let us consider the friction coefficient [17]:

$$C_f = \frac{\tau_w}{0.5\rho U^2}, \quad (7)$$

where τ_w is the frictional stress at the interface.

Using the nondimensionalization parameters, the expression for the frictional stress can be written as follows:

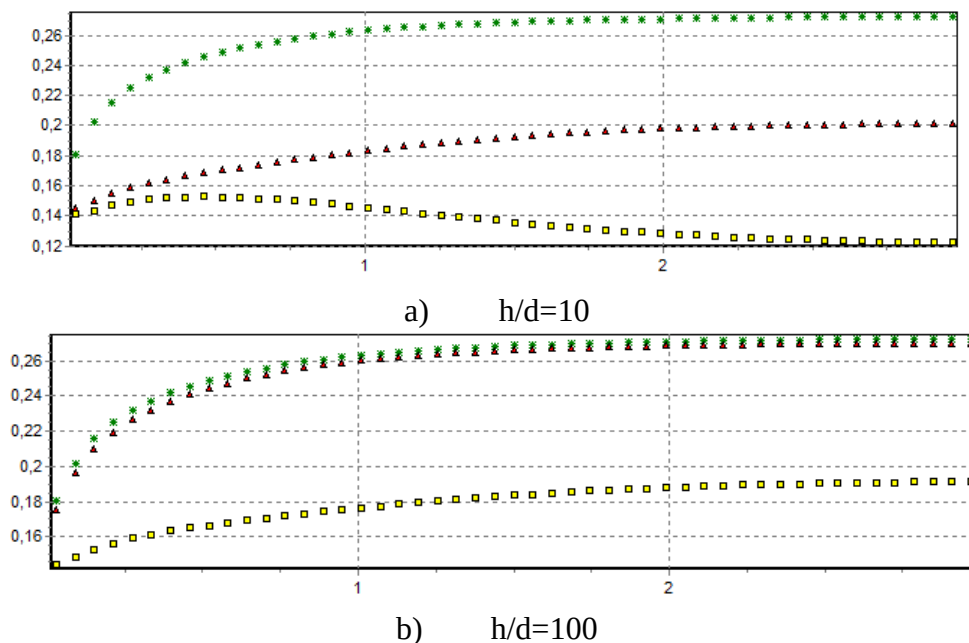
$$\tau_w = \frac{\mu U}{h} \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad (8)$$

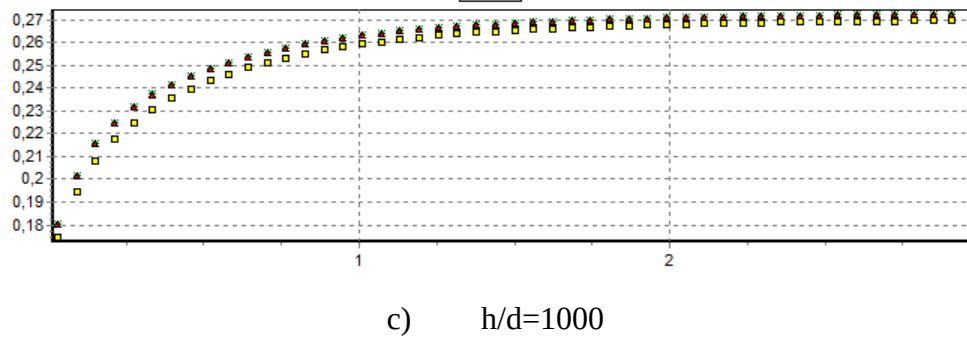
where n is the dimensionless outward normal to the bottom surface, and the index "w" denotes the bottom surface.

Substituting expression (7) into equation (6), we obtain an expression for the friction coefficient:

$$C_f = \frac{2}{Re} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_w \quad (9)$$

Fig. 2 shows the numerical results of the drag coefficient calculated using formula (9).





c) $h/d=1000$
 Fig. 2. Change in the resistance coefficient at the interface with different porosity.
 $Re=100, \delta=0.2$

Figure 2 shows the drag coefficient for a channel with a porous layer at various porosity values. Lines with asterisks correspond to porosity ($f = 0.000001$), triangles to porosity ($f = 0.9$), and rectangles to porosity ($f = 0.99$). These values allow us to trace the transition from a nearly impermeable structure (very low porosity) to significantly more permeable porous media.

An analysis of Figure 2 shows that the ratio of the characteristic channel length (in this case, its width) to the characteristic grain size of the porous layer significantly influences the drag coefficient. For a fixed channel width, a decrease in the characteristic grain size results in drag coefficient values for the porous layer becoming closer to those typical of a smooth solid wall. Physically, this means that with a sufficiently fine structure of the porous material, the influence of microgeometry averages out, and the flow near the boundary behaves similarly to flow near a solid wall.

It should be emphasized that a porous layer with very low porosity can serve as an approximate model of a solid wall, since filtration transport through such a layer is negligible. Therefore, the curve marked with asterisks ($f = 0.000001$) can, with a sufficient degree of accuracy, be considered a reference case corresponding to a solid wall (or the limiting transition to one). This is convenient for comparison: the deviation of the other curves from this dependence characterizes the degree of influence of the permeability and structure of the porous medium on hydraulic losses.

The graphs in Figure 2 also demonstrate a general trend: the presence of a porous layer, as well as an increase in its porosity, lead to a decrease in the drag coefficient. In other words, when moving from a less porous to a more porous structure, hydraulic losses decrease. This effect can be interpreted as a consequence of increasing layer permeability: part of the flow or momentum is redistributed near the boundary, which leads to a decrease in drag compared to the case of an impermeable wall.

In addition to the influence of porosity and characteristic grain size, calculations were performed to assess the role of the porous layer thickness. Thickness determines how deeply the effects of filtration and flow interaction with the porous structure manifest themselves, and therefore can significantly change the total pressure losses. Figure 3 shows the drag coefficient for a dimensionless porous layer thickness of (0.1). A comparison of the results in Figure 3 with the data in Fig. 2 allows us to separate the influence of the geometric parameters of the porous layer (thickness, grain size) from the influence of its structural parameter - porosity - and thereby clarify the contribution of each factor to the formation of flow resistance

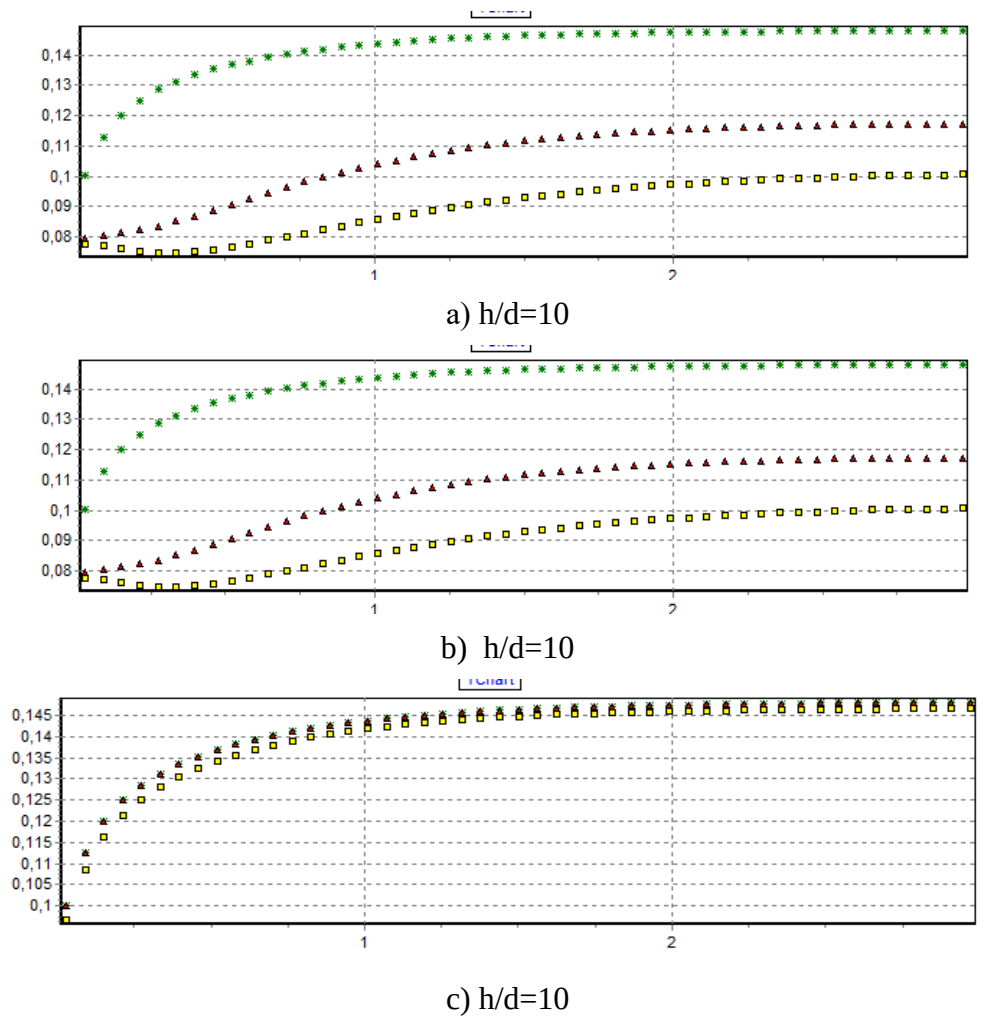
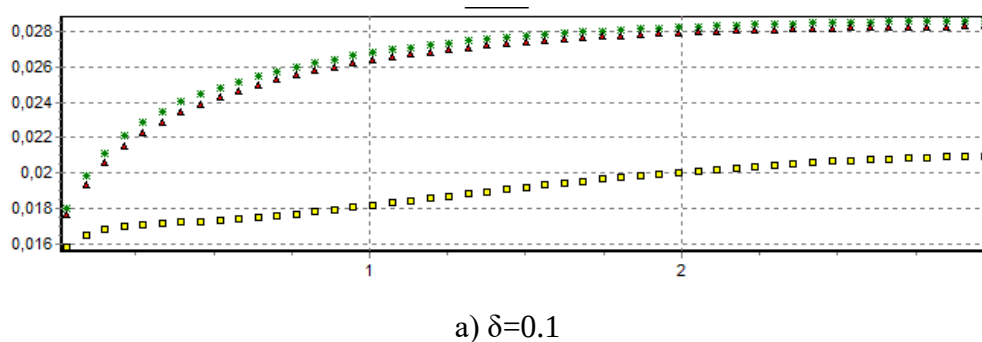


Fig. 3 Change in the resistance coefficient at the interphase boundary at different porosity.
 $Re=100$, $\delta=0.1$

A comparative analysis of Figures 2 and 3 demonstrates agreement with the statement presented in Figure 2. Based on a comparison of these figures, it can be concluded that decreasing the thickness of the porous layer leads to a decrease in bottomhole resistance, all other conditions being equal. This conclusion also holds true with increasing Reynolds number (Figure 4).



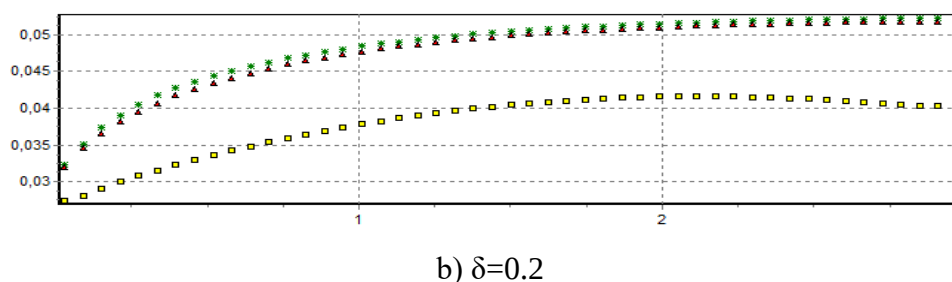


Fig.4 Change in the resistance coefficient at the interphase boundary at different porosity.
 $Re=500$, $h/d=100$

Conclusion

Boundary porous structures have the property of reducing drag, with the higher the porosity of the layer, the lower the drag.

Decreasing the thickness of the porous layer helps reduce drag, which helps control flow in channels.

Using an equation within a single computational domain is preferable to the separate-zone method. This eliminates the uncertainty of the empirical Beavers-Joseph coefficient and allows for a physically correct description of momentum diffusion into the porous layer.

References

1. Nigmatulin, R. I., Fundamentals of the mechanics of heterogeneous media, Moscow, Izdatel'stvo Nauka, 336 p. In Russian, (1978)
2. Handbook of Porous Media (K. Vafai (ed.)), 3rd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 2015.
3. M.K. Das, P.P. Mukherjee, and K. Muralidhar. Modeling Transport Phenomena in Porous Media with Applications. Springer Nature PublishingAG, Cham, Switzerland, 2018
4. R. Helmig, B. Flemisch, M. Wolff, and B. Faigle. Efficient Modeling of Flow and Transport in Porous Media Using Multi-physics and Multi-scale Approaches. In: Handbook of Geomathematics (W. Freeden, M.Z. Nashed, T. Sonar (eds.)), 2nd ed., pp. 703–749. Springer-Verlag, Berlin, 2015.
5. Calculation of incompressible flows in a porous body-free flow system / S.V. Polyakov [et al.] // Keldysh Institute of Applied Mathematics Preprints. 2021. No. 71. 19 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-71> <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-71>
6. D.A. Nield and A. Bejan. Convection in Porous Media, 5th ed. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2017.
7. M. Nazari, Y. Mahmoudi, and K. Hooman. Introduction to Fluid Flow and Heat Transfer in Porous Media. In: Convective Heat Transfer in Porous Media (Y. Mahmoudi, K. Hooman, K. Vafai (eds.)), pp. 3–18, CRC Press, Boca Raton, FL, 2020.
8. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, ISBN 9780891165224 Published January 1, by CRC Press, (1980).
9. Dalaboev U. Flow Structure through a Stationary Granular Bed. Engineering Physics Journal, Minsk, Vol. 70, No. 3, 1997, pp. 390–394.
10. Dalabaev Umuridin. Mathematical Description of the Fluid Flow Outside and Inside a Porous Medium Based on an Interpenetrating Model. AIP Conference Proceedings. 2021. 2365. 060015, <https://doi.org/10.1063/5.0057568>
11. Umuridin Dalabaev. Influence of the Form of Porous Insert in the Flow of a Viscous Liquid in a Plane Pipe. , Journal of Applied Mathematics and Physics, 2022, 10, 372–378. <https://www.scirp.org/journal/jamp> DOI: 10.4236/jamp.2022.102029

12. Dalabaev Umuridin, Ikramova Malika, Latipov Nusratilla. Numerical Study of Viscous Flow Behavior during Cylindrical Particle Rotation. Journal of Xidian University. 7.11.2025 (Q4) <https://doi.org/10.5281/Zenodo.17552247>
13. Dalabaev Umuridin, Umarova Shoirra, Latipov Nusratilla. Numerical Study of Viscous Fluid Flow at the Inlet Section. Journal of Xidian University. 27.03.2026 (Q4) <https://doi.org/10.5281/Zenodo.19253946>
14. Dalabaev Umuridin, Ikramova Malika, Latipov Nusratilla. Flow Modeling with Porous Media Using the Viscous Shallow Water Equation. International Scientific and Practical Conference. PROCEEDINGS, January 15, 2026 Tashkent, Uzbekistan 364-389.
15. Seytov Aybek, Esonturdiyev Mamatqobul, Subhonov Muhammadjon, Salayeva Mekhribon. Mathematical models in the process of water resource distribution in main channels of irrigation systems taking into account boundary conditions. International Scientific and Practical Conference. PROCEEDINGS, January 15, 2026 Tashkent, Uzbekistan 183-192.
16. Seytov Aybek, Uteuliev Niyetbay, Turaev Rasul, Salayeva Mekhribon. Modeling of unsteady water movement in open canals during the construction of transport facilities. International Scientific and Practical Conference. PROCEEDINGS, January 15, 2026 Tashkent, Uzbekistan 193-204
17. Loitsyanskii L.G. Mechanics of liquids and gases. New York: Begell House, 1995. 971.

[DOI 10.5281/zenodo.20250881](https://doi.org/10.5281/zenodo.20250881)

РОЛЬ ВОДНОЙ ДИПЛОМАТИИ В ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Хасанов Нозим Бахтиярович,
Главный специалист управления Международного сотрудничества,
грантов и рейтингов Национального комитета
экологии и изменения климата Республики Узбекистан

Аннотация

Данная статья исследует современные экологические вызовы Центральной Азии, обусловленные трансграничным использованием водных ресурсов в контексте изменения климата. Особое внимание уделяется водной дипломатии как ключевому механизму регионального сотрудничества, направленному на предотвращение экологических угроз, обеспечение устойчивого развития и укрепление экологической безопасности. Анализируются вопросы управления водными ресурсами бассейнов Амударьи и Сырдарьи, последствия экологического кризиса Аральского моря, а также перспективы международного взаимодействия государств региона. Исследуются современные подходы к интегрированному управлению водными ресурсами и роль международных организаций в формировании устойчивой системы водного сотрудничества.

Ключевые слова: водная дипломатия, Центральная Азия, экологическая безопасность, изменение климата, трансграничные воды, устойчивое развитие, международное сотрудничество, Аральское море.

Введение

В современном мире изменение климата и ухудшение состояния окружающей среды представляют собой чрезвычайно серьезные вызовы для международного сообщества. Ускоренное истощение природных ресурсов, рост населения и возрастающие экономические потребности приводят к обострению экологических проблем во многих регионах. Центральная Азия сталкивается с этими процессами особенно остро, поскольку вопросы

водообеспечения напрямую влияют на ее социально-экономическое развитие, экологическую безопасность и региональную стабильность.

Центральная Азия обладает ограниченными водными ресурсами и при этом экономики стран региона в значительной мере зависят от сельского хозяйства, которое в свою очередь, потребляет большие объемы воды. Большая часть пресной воды формируется за пределами стран нижнего течения рек, что требует постоянного межгосударственного взаимодействия. Основными источниками водоснабжения региона остаются реки Амударья и Сырдарья, бассейны которых охватывают территории нескольких государств [1].

В условиях изменения климата проблемы распределения и рационального использования воды становятся все более комплексными. По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), в Центральной Азии наблюдается устойчивое сокращение площади ледников, являющихся основным источником питания трансграничных рек. В отдельных горных районах Тянь-Шаня и Памира сокращение ледниковых масс достигает 30% по сравнению с серединой XX века [2]. Поскольку более 80% водных ресурсов региона формируется в горных районах Кыргызстана и Таджикистана, дальнейшее таяние ледников представляет серьезную угрозу водной безопасности Центральной Азии.

По оценкам Всемирного банка, к 2050 году доступные водные ресурсы в некоторых странах региона могут сократиться на 10-15%, в то время как потребности в воде будут расти из-за демографического роста и развития сельского хозяйства.

Одним из наиболее серьезных последствий неэффективного природопользования стал кризис Аральского моря, признанный одной из крупнейших экологических катастроф современности. Высыхание моря привело к деградации экосистем, ухудшению состояния здоровья населения и возникновению масштабных социально-экономических проблем [3].

Страны Приаралья предпринимают масштабные усилия по преодолению последствий гибели Аральского моря и решения проблем трансграничного водопользования. В данной ситуации особую значимость приобретает водная дипломатия как механизм координации интересов государств и формирования устойчивой системы регионального сотрудничества. Водная дипломатия позволяет развивать политический диалог, идти на компромиссы, укреплять доверие между государствами и совместно решать экологические проблемы.

Целью настоящей статьи является исследование роли водной дипломатии в предотвращении экологических проблем Центральной Азии и анализ перспектив развития регионального сотрудничества в сфере управления трансграничными водными ресурсами.

Экологические проблемы водного сектора Центральной Азии

Сокращение водных ресурсов и изменение климата

Одной из наиболее острых проблем Центральной Азии является неуклонное сокращение запасов пресной воды. Главным виновником этого процесса выступает глобальное изменение климата, проявляющееся в ускоренном таянии ледников и нарушении привычных режимов выпадения осадков. Ледники, питающие реки региона, такие как Тянь-Шань и Памир, за последние десятилетия заметно уменьшились в размерах [4]. Исследования Программы ООН по окружающей среде (UNEP) показывают, что среднегодовая температура в Центральной Азии за последние десятилетия повысилась на 1-2°C, опережая мировые темпы [5]. Этот температурный рост ускоряет испарение влаги, приводит к деградации почв и усиливает процессы опустынивания. Международные климатические организации прогнозируют существенное сокращение доступных водных ресурсов к середине XXI века, что ставит под угрозу жизнедеятельность сельского хозяйства, энергетического сектора и продовольственную безопасность стран региона.

Дополнительным фактором усугубления проблемы является неэффективное использование воды в системах орошения. Во многих государствах региона до сих пор применяются устаревшие технологии полива, при которых значительная часть воды теряется из-за испарения и просачивания в почву. Низкая эффективность водопользования ведет к деградации земель и общему ухудшению экологической обстановки. По данным ООН, более

20% территории Центральной Азии уже подвержено различным формам деградации земель, что затрагивает около 30% населения [6]. Изменение климата также способствует учащению экстремальных погодных явлений, таких как засухи, пыльные бури и расширение пустынных зон.

Экологический кризис Аральского моря

Серьезнейшей экологической проблемой Центральной Азии является кризис Аральского моря, вызванный многолетним интенсивным использованием вод Амударьи и Сырдарьи для нужд сельского хозяйства [7]. Это привело к катастрофическому снижению уровня моря и разрушению его самобытной экосистемы. Если в 1960 году площадь Аральского моря составляла примерно 68 тысяч квадратных километров, то в последующие десятилетия она уменьшилась более чем на 90% из-за масштабного отвода воды для орошения [8]. Сегодня высохшее дно Аральского моря занимает свыше 54 тысяч квадратных километров, образовав новую пустыню – Аралкум [9].

Последствия высыхания моря ощутимо сказываются на климате региона. Увеличение засоленности почв, ухудшение качества воздуха и распространение солевых бурь привели к росту заболеваемости среди населения и общему снижению уровня жизни. Особую опасность представляют пыльно-солевые бури, возникающие на высохшем дне моря. По данным современных исследований, ежегодные выбросы пыли в регионе увеличились почти в два раза — с 14 млн тонн в 1984 году до 27 млн тонн в 2015 году [10]. В результате Центральная Азия стала примерно на 7 % более подвержена запыленности по сравнению с показателями тридцатилетней давности [11].

Токсичность этой пыли, обогащенной остатками пестицидов и солей, накопленных в результате интенсивного сельского хозяйства, представляет серьезную опасность для здоровья. Пыльные бури способствуют распространению респираторных заболеваний и ухудшают санитарно-эпидемиологическую обстановку.

В последние годы государства региона, совместно с международными партнерами, реализуют программы по преодолению последствий этого кризиса. Одним из наиболее значимых проектов является озеленение высохшего дна Аральского моря. В Узбекистане ежегодно проводятся мероприятия по посадке саксаула и других пустынных растений в Приаралье, что способствует замедлению процессов опустынивания и сокращению числа пылевых бурь.

Водно-энергетические проблемы региона

Экологическая нестабильность часто возникает из-за противоречивых интересов государств в вопросах водопользования. Страны, расположенные в верховьях рек, как правило, заинтересованы в развитии гидроэнергетики, что предполагает активное использование водных потоков. Напротив, государства, находящиеся ниже по течению, критически зависят от воды для обеспечения своих сельскохозяйственных нужд [12]. Сезонный характер водопотребления добавляет сложности в достижение баланса интересов. В частности, в зимний период страны верхнего течения могут увеличивать сброс воды для производства электроэнергии, что идет вразрез с потребностями нижних стран, которым необходимо накапливать воду для летнего орошения. Конфликт интересов не раз становился триггером для обострения отношений между государствами региона. В свете этих вызовов, формирование прочных механизмов межгосударственного взаимодействия и совместного управления водными ресурсами приобретает первостепенное значение.

Водная дипломатия как механизм регионального сотрудничества

Водная дипломатия и развитие регионального сотрудничества

Водная дипломатия — это система политических, правовых и институциональных мер, созданная для регулирования использования трансграничных водных ресурсов. Ее главная задача — найти золотую середину между интересами государств, сохраняя при этом экологическую устойчивость [13]. Современная водная дипломатия базируется на доверии, сотрудничестве и разумном использовании природы, проявляясь в межгосударственных

переговорах, международных соглашениях и совместных экологических программах. Для Центральной Азии, где устойчивое развитие напрямую зависит от эффективного водного сотрудничества, водная дипломатия является вопросом стратегической важности.

Распад Советского Союза поставил перед государствами Центральной Азии задачу создания новых механизмов управления трансграничными водными ресурсами. Одним из первых институциональных шагов стало учреждение Международного фонда спасения Арала (МФСА), призванного координировать региональные усилия по ликвидации последствий экологической катастрофы и развитию сотрудничества в водной сфере. Тем не менее, последующие десятилетия характеризовались сложными водно-энергетическими отношениями, отмеченными периодическими разногласиями по вопросам распределения вод Амударьи и Сырдарьи, а также конфликтом интересов между странами, расположенными выше и ниже по течению рек [14].

Поворотным моментом стали события, начавшиеся в 2017 году, когда по инициативе Президента Узбекистана Ш.Мирзиёева был взят курс на активизацию регионального сотрудничества и укрепление добрососедских связей. Этот новый внешнеполитический подход был нацелен на развитие конструктивного диалога, поиск компромиссов, восстановление доверия и переход от конфронтационной модели водопользования к кооперационной.

В результате этих инициатив значительно активизировались политические контакты на высшем уровне. Возобновились регулярные консультативные встречи глав государств Центральной Азии, где вопросы рационального использования водных ресурсов и экологической безопасности заняли центральное место в повестке дня. Существенно расширилось сотрудничество между профильными министерствами и ведомствами, включая водохозяйственные и энергетические структуры.

Особое значение приобрело продвижение принципов взаимного учета интересов стран верхнего и нижнего течения рек, а также развитие механизмов взаимовыгодного обмена водными и энергетическими ресурсами. Это способствовало формированию более сбалансированного формата взаимодействия, основанного на доверии, прагматизме и совместной ответственности за устойчивое развитие региона.

Кроме того, возросла роль многосторонних платформ и международных инициатив, поддерживающих региональный диалог. Водная проблематика стала рассматриваться не только как технический вопрос распределения ресурсов, но и как ключевой элемент региональной безопасности и устойчивого развития Центральной Азии.

В целом, начиная с 2017 года, наблюдается качественная трансформация водно-энергетического взаимодействия государств региона, выражающаяся в переходе от фрагментарного и конфликтного подхода к более системной и кооперационной модели управления трансграничными водными ресурсами.

Роль международных организаций

В продвижении водной дипломатии значительный вклад вносят международные структуры, в числе которых ООН, Всемирный банк, ОБСЕ и Европейский Союз. Эти организации выступают в качестве доноров технической, финансовой и экспертной помощи для государств региона [15]. Благодаря их поддержке осуществляются проекты по обновлению водохозяйственной инфраструктуры, внедрению эффективных водосберегающих методов и повышению компетенций специалистов, занимающихся управлением водными ресурсами. Важным направлением является развитие интегрированного управления водными ресурсами, которое предполагает всесторонний анализ экологических, экономических и социальных факторов.

Роль водной дипломатии в предотвращении экоконфликтов

Водная дипломатия выступает в качестве инструмента, способствующего повышению уровня экологической безопасности в регионе и минимизации негативных последствий

климатических трансформаций. Кооперативное управление водными ресурсами предоставляет государствам возможность более результативно реагировать на возникающие экологические вызовы. Одним из центральных направлений является развитие интегрированного управления водными ресурсами, подразумевающего комплексное рассмотрение экологических, экономических и социальных факторов в процессе принятия решений [16].

Существенное значение имеет имплементация инновационных технологий. Так, в Узбекистане наблюдается активное развитие системы капельного орошения, что ведет к значительному сокращению водопотребления в аграрном секторе.

Согласно данным национальных программ, применение современных методов ирригации обеспечивает экономию водных ресурсов в объеме до 40–50 % по сравнению с традиционными подходами к поливу. Важным аспектом сотрудничества является развитие научных исследований в этой сфере. Совместные климатические и гидрологические изыскания позволяют осуществлять прогнозирование изменений водного баланса и разрабатывать соответствующие адаптационные меры. Кроме того, водная дипломатия способствует формированию экологической культуры и повышению уровня общественного внимания к проблематике рационального природопользования.

По мере того как мир сталкивается с последствиями глобальных климатических изменений, значение водной дипломатии будет неуклонно расти. Одним из фундаментальных направлений в этой сфере остается создание единой региональной стратегии, призванной обеспечить надежную водную безопасность. Значительный потенциал для развития водного сектора кроется в его цифровизации. Интеграция спутниковых технологий, геоинформационных систем и автоматизированных систем мониторинга водных ресурсов позволит достичь более высокого уровня управления и прогнозирования экологических угроз [17]. Параллельно с этим, развитие международного научного сотрудничества и обмен передовыми практиками в области устойчивого управления водными ресурсами приобретают дополнительную важность. В дальнейшем, ключевую роль в эволюции водной дипломатии будут играть инициативы молодежи и экологических движений, направленные на формирование глобальной культуры рационального использования водных ресурсов.

Заключение

Водная дипломатия выступает одним из важнейших инструментов предотвращения экологических проблем в Центральной Азии. В условиях изменения климата и роста дефицита водных ресурсов межгосударственное сотрудничество приобретает стратегическое значение для обеспечения устойчивого развития региона.

Совместное управление трансграничными водными ресурсами способствует укреплению экологической безопасности, снижению негативных последствий климатических изменений и развитию устойчивого природопользования.

Для дальнейшего совершенствования эффективного использования потенциала водной дипломатии необходимо расширять региональный диалог, внедрять современные технологии управления водными ресурсами и укреплять международное сотрудничество.

Список литературы

1. Алимов Р. Центральная Азия: общность интересов. — Ташкент: Baktoria Press, 2015.
2. IPCC Climate Change 2023: Impacts, Adaptation and Vulnerability. — Geneva: IPCC, 2023.
3. Micklin P. The Aral Sea Disaster // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2007. — Vol. 35. — P. 47–72.
4. UNEP. Global Environment Outlook: Central Asia. — Nairobi, 2022.
5. UNECE. Water Cooperation and Climate Change Adaptation in Central Asia. — Geneva, 2021.
6. United Nations Convention to Combat Desertification. Global Land Outlook. — Bonn, 2022.
7. Glantz M. Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin. — Cambridge University Press, 1999.

8. Britannica. Aral Sea. — 2024.
9. Opp C., Groll M. Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations // Journal of Arid Environments. — 2012.
10. Wang X. et al. Assessment and prediction of dust emissions in Central Asia // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2026.
11. TROPOS Research Institute. Aral Sea has made Central Asia significantly dustier. — 2024.
12. Wegerich K. Hydro-hegemony in the Amu Darya Basin // Water Policy. — 2008. — Vol. 10. — P. 71–88.
13. Wolf A. Shared Waters: Conflict and Cooperation // Annual Review of Environment and Resources. — 2007. — Vol. 32. — P. 241–269.
14. Международный фонд спасения Арала: региональное сотрудничество в Центральной Азии. — Алматы, 2022.
15. UNECE. Transboundary Water Cooperation in Central Asia. — New York; Geneva, 2021.
16. Global Water Partnership. Integrated Water Resources Management. — Stockholm, 2020.
17. World Bank. Water Security in Central Asia: Policy and Institutional Challenges. — Washington, 2021.

[DOI 10.5281/zenodo.20231756](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231756)

**Numerical modeling and optimization of water flow management in main irrigation canals
based on the finite difference method**

Nietbay Uteuliev^{1, a)}, Gafur Djaykov^{1, b)}, Sherzod Yadgarov^{1, c)}

¹*Nukus State Technical University, Nukus, Uzbekistan*

^{a)}*utewlievn@mail.ru*

^{b)}*gafur_djaykov@mail.ru*

^{c)} *Corresponding author: shyadgarov@mail.ru*

Abstract. The article examines the task of optimal water resource management in a main irrigation canal. To describe the dynamics of water flow change, a differential transfer model is used, accounting for the flow distribution along the canal and the distributed water intake. As an optimal criterion, a functional is introduced that includes the deviation of the actual water flow from the required optimal value along the entire length of the canal and in the outlet section. To numerically solve the problem, the finite difference method is applied, based on which a stable difference scheme and an iterative algorithm for calculating water flow in a spatiotemporal grid are constructed. Particular attention is paid to the relationship between the control action at the channel input and the value of the target functional. It has been shown that optimizing the control signal allows for the stabilization of water flow distribution along the canal and increases the efficiency of water resource utilization. The proposed numerical approach can be used in modeling and automated management of irrigation systems.

Keywords: optimal management, irrigation canal, water resources, finite difference method, difference scheme, functionality, numerical modeling.

INTRODUCTION

In the management of modern hydraulic engineering and water management systems, it must be taken into account that the dynamics of water flow in main canals are complex in nature. Simplifying complex mathematical models and finding their optimal solutions for the precise and rapid control of such processes is one of the urgent tasks. This article provides a detailed analysis of optimal control methods for simplified models describing the unstable movement of water resources in the main canals of irrigation systems. In particular, the finite difference method was used to convert continuous processes into discrete form and to effectively organize computational work. [1-3].

The algorithm for numerically solving the problem based on the finite difference method and its relationship with the functional is presented step-by-step. The algorithm for numerically solving the problem of optimal water resource management in the main canal of the irrigation system using the finite difference method and its relationship with the target functional is presented:

1) To optimize the change in water discharge along the main canal over time and distance, the following objective functional is adopted:

$$I(u) = \int_0^T \int_0^l (Q(x,t) - Q^*)^2 dx dt + \int_0^T (Q(l,t) - Q^*)^2 dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

where $Q(x,t)$ is the time-dependent water flow along the channel, Q^* is the required optimal flow, and $u(t)$ is the control action at the head of the channel.

The purpose of this functional is the optimal management of water resource consumption along the channel and $Q(x,t)$ in the downstream pool according to Q^* [4-6].

Functional minimization is carried out when the following dynamic constraint conditions are met:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t), \quad Q(0,t) = u(t), \quad Q(x,0) = Q_0(x), \quad (2)$$

where $v > 0$ is the wave propagation velocity, and $q(x,t)$ is the water withdrawal value distributed along the channel.

2) To numerically calculate the differential equation, a discrete grid is introduced for the variables x and t .

By channel:

$$x_i = i\Delta x, \quad i = 0, 1, \dots, N_x, \quad \Delta x = \frac{l}{N_x}.$$

By time:

$$t^n = n\Delta t, \quad n = 0, 1, \dots, N_t, \quad \Delta t = \frac{T}{N_t}.$$

The grid variable is defined as follows:

$$Q_i^n \approx Q(x_i, t^n)$$

thus, it is possible to calculate the value of Q at each point along the channel and at each time step [7-8].

3) Since $v > 0$ in the model, the main direction of wave propagation moves forward along x . Therefore, a finite difference scheme is chosen to give a stable and physically meaningful result in numerical calculation:

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + v \frac{Q_i^n - Q_{i-1}^n}{\Delta x} = q_i^n.$$

From this equation, the following iterative calculation formula follows:

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - \frac{v\Delta t}{\Delta x} (Q_i^n - Q_{i-1}^n) + \Delta t q_i^n.$$

This formula allows you to calculate channel-wide consumption at each time step based on previous time values. [9-10].

4) Boundary and initial conditions:

$$Q_i^0 = Q_0(x_i),$$

$$Q_0^n = u(t^n).$$

The most important point here is that the flow rate at the main point of the channel is completely determined by the control signal.

5) To ensure the stable operation of the finite difference scheme and the absence of oscillations during the calculation process, the stability condition must be met:

$$\frac{v\Delta t}{\Delta x} \leq 1.$$

In practice, this condition is an important criterion for the correct selection of calculation steps.

6) The functional integral I is reduced to the form of a discrete sum for numerical calculation:

$$I \approx \sum_{n=0}^{N_t-1} \sum_{i=0}^{N_x} (Q_i^n - Q^*)^2 \Delta x \Delta t + \sum_{n=0}^{N_t-1} (Q_{N_x}^n - Q^*)^2 \Delta t,$$

where the first addend takes into account the total quadratic deviation along the channel and the second addend takes into account the quadratic deviation at the output point (i.e. $x=1$) [11].

Thus, the functional yields the following two main conclusions:

- functionally fully dependent on the grid-calculated (Q_i^n);

- (Q_i^n) is formed entirely through $u(t)$ control.

7) The relationship between the control effect and functionality is represented by the following chain:

$$u(t) \Rightarrow Q_0^n \Rightarrow Q_i^n \Rightarrow I(u),$$

that is:

- $u(t) \rightarrow$ input flow rate;
- input flow $\rightarrow$ changes the dynamics of the $Q(x,t)$ throughout the entire channel;
- $Q(x,t) \rightarrow$ determines the value of the functional $I(u)$

Therefore, stabilization of flow along the channel is achieved by optimizing the $u(t)$ [12-13].

8) The numerical solution algorithm for the problem is implemented in the following stages.:

Step 1. Add input parameters:

$$l, T, v, Q^*;$$

Step 2. Network construction:

$$x_i, t^n, \Delta x, \Delta t;$$

Step 3. Provision of an initial condition:

$$Q_i^0 = Q_0(x_i);$$

Step 4. Assign initial value for control:

$$u^0(t^n);$$

Step 5. For each time step:

- boundary condition:

$$Q_0^n = u(t^n);$$

- calculation using a finite difference scheme:

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - \frac{v\Delta t}{\Delta x} (Q_i^n - Q_{i-1}^n) + \Delta t q_i^n;$$

Step 6. Calculating the functional based on the calculated Q_i^n :

$$I = \int_0^T \int_0^l [Q(x,t) - Q^*]^2 dx dt + \int_0^T [Q(l,t) - Q^*]^2 dt \rightarrow \min;$$

Step 7. Update management:

- Gradient projection method or
- by random search method

$$u^{m+1}(t) = (u^m(t)).$$

9) The general cycle of finite-difference optimization—the numerical solution of optimal control—is implemented as an iterative process:

$$u^m(t) \Rightarrow Q^m(x,t) \Rightarrow I(u^m) \Rightarrow u^{m+1}(t),$$

where in each iteration, the control $u(t)$ is updated and the functional value decreases. Thus, in the finite difference method, the partial differential equation is discretized in the grid and Q_i^{n+1} is calculated at each time step. Since the initial boundary condition is $Q_0^n = u(t^n)$, the dynamics of $Q(x,t)$ depend entirely on the control signal. Therefore, the functional $I(u)$ is directly linked to control through the Q_i^n calculated in the grid and minimized by optimization algorithms.

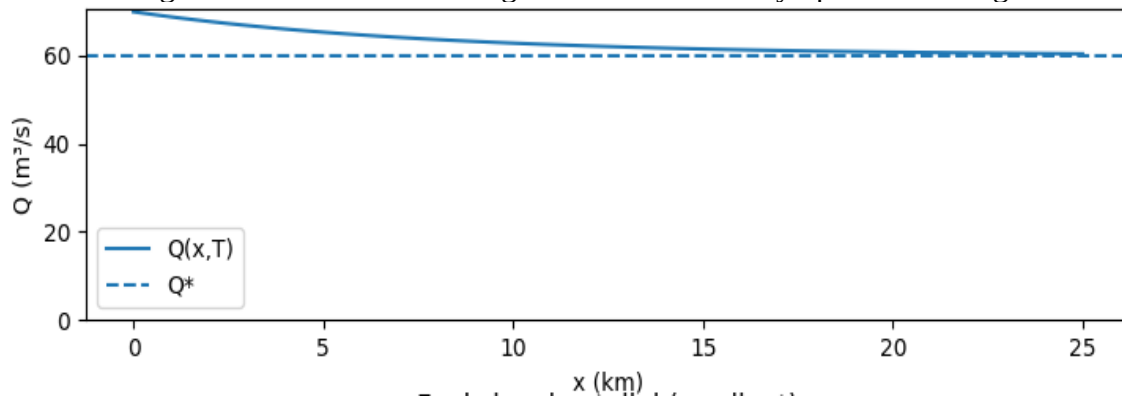


Figure 1. Change in water flow rate using the gradient projection method.

In the section of canal parameters, the result obtained using the gradient projection method is shown in Figure 1, with values at $L = 25$ km, $T = 24$ hours, $Q^* = 60$ m³, $H = 2.3$ m, and $Max = 300$. In this case, the initial distance, i.e., the turbulent movement of water in the upper reaches of the section, is reduced, and the water flow for 14 kilometers is equalized with the optimal flow, i.e., the water withdrawal value of each water consumer, and optimal management is achieved.

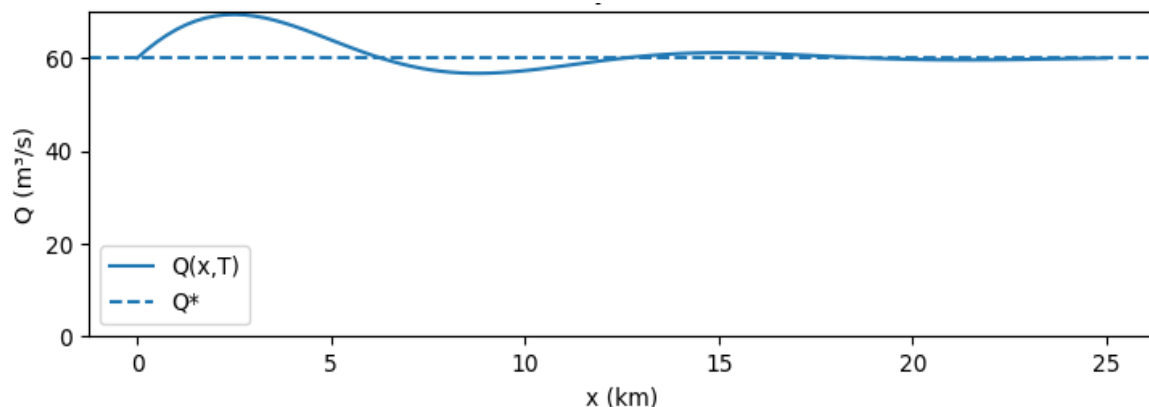


Figure 2. Changes in water consumption using the random search method.

In the section of canal parameters, the result obtained using the random search method is shown in Fig. 2, with values at $L=25$ km, $T=24$ hours, $Q^*=60$ m³, $H=2.3$ m, and $Max=300$. In this case, the initial distance, i.e., the turbulent movement of water in the upper reaches of the section, is reduced, and the water flow at 14 km is equalized with the optimal flow, i.e., the water withdrawal value of each water consumer, and non-uniform control is observed.

CONCLUSION

The article examined the issue of optimal water resource management within the main irrigation canal. To characterize the dynamics of water discharge changes, a differential displacement model was used, taking into account the distribution of flow along the canal and distributed water intake. A functional was introduced as an optimality criterion, including the deviation of the actual water flow in the entire length of the canal and the outlet section from the required optimal value. The finite difference method was used for the numerical solution of the problem, on the basis of which a stable difference scheme and an iterative algorithm for calculating water flow in a time-space

network were constructed. The relationship between the control action at the channel inlet and the target functional value was considered. The optimization of the control signal made it possible to stabilize the distribution of water flow along the canal and increase the efficiency of water resource utilization.

REFERENCES

1. [Seytov, A., Abdurakhmanov, O., Kakhkhorov, A., Karimov, D., Abduraimov, D. Modeling of two-dimensional unsteady water of movement in open channels. E3S Web of Conferences, 2024, 486, 01023.](#)
2. [Turaev, R., Seytov, A., Kuldasheva, S., Nortoijev, U. Algorithms for calculating limits in water management in irrigation systems. E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02016.](#)
3. Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Usage of finite element method for modeling twodimensional unsteady water movement in open channels. AIP Conf. Proc. 3147, 030034 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210332>.
4. Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Development of algorithms for modelling water management processes on main canals. AIP Conf. Proc. 3147, 030032 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210329>.
5. Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov; Otabek Ergashev; Olim Abduraxmanov. Development of algorithms for solving problems of optimisation of water resource management in irrigation systems. AIP Conf. Proc. 3147, 030033 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210330>.
6. Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Sayfiddin Bahromov; Yusup Qutlimuratov; Bakhadir Begilov; Seytimbetov Dauletyar. Optimal management of water resources of large main canals with cascades of pumping stations. AIP Conf. Proc. 3147, 030022 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210523>.
7. [Uteuliev, N.U., Qutlimuratov, Y.Q., Yadgarov, S.A. Using the methods and optimizing criteria in making the managing decisions of agricultural production. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019, 9011907.](#)
8. [Ermol'ev, Yu.M., Mikhalevich, M.V., Uteuliev, N.U. Economic modeling of international water use \(the case of the aral sea basin\). Cybernetics and Systems Analysis, 1994, 30\(4\), pp 523–527.](#)
9. [Nurmukhamedov, T.R., Gulyamov, J.N., Tashmetov, T.Sh. Development of the Information System for Inventory Control of Wagon Depot Stock. AIP Conference Proceedings, 2022, 2432, 060026](#)
10. Seytov, S.J., Eshmamatova, D.B. Discrete Dynamical Systems of Lotka–Volterra and Their Applications on the Modeling of the Biogen Cycle in Ecosystem. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2023, 44(4), – P. 1471–1485
11. Varlamova Lyudmila, P., Seytov Aybek, J., Bahromov Sayfiddin, A., Shokhjakhon Sh, B., Mirzaolimov Akhmadjon, K. Digital Agricultural Ecosystem: Revolutionary Advancements in Agriculture, 2024, pp 339–368.
12. Butkovsky A. G. Theory of optimal control of systems with distributed parameters. - 1965.
13. Klimov V.E. Optimal operating mode of pumping stations equipped with axial pumps. Hydraulics and Land Reclamation, 1970, No. II. PP. 30-35.

Анализ деградации почвенного покрова в бассейне реки Кафарниган**Хикматуллозода Н.Х.¹, Гулахмадзода А.А.^{1,*}, Иноятова К.Л.¹**

¹ *Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана*

** Автор-корреспондент*

e-mail: agulakhmadov@gmail.com

Аннотация

В статье представлена оценка деградации почвенного покрова в бассейне реки Кафарниган на основе индекса оголённой почвы (Bare Soil Index, BSI), рассчитанного по спутниковым данным Landsat и Sentinel за 2000, 2010, 2020 и 2024 гг. Проведён пространственный анализ распределения значений индекса. Выявлены зоны с различной степенью оголения почв. Установлено, что наибольшая деградация характерна для южных и предгорных территорий, тогда как северные горные районы сохраняют устойчивый растительный покров. Полученные результаты подтверждают эффективность применения индекса BSI для мониторинга деградации земель и разработки мер по устойчивому управлению природными ресурсами.

В работе проведена оценка деградации почвенного покрова бассейна реки Кафирниган на основе индекса оголённой почвы (Bare Soil Index, BSI), рассчитанного по данным спутников Landsat и Sentinel за 2000, 2010, 2020 и 2024 гг. Построены карты пространственного распределения BSI и выполнен сезонный анализ показателей оголения и риска деградации. Установлено выраженное пространственное различие: горная северная часть бассейна характеризуется низким уровнем оголения почв, тогда как южные и предгорные территории демонстрируют высокие значения BSI, связанные с интенсивным землепользованием и эрозионными процессами.

Ключевые слова: BSI, деградация почв, дистанционное зондирование, ГИС, Кафарниган, экология

Введение

Деградация почв является одной из наиболее актуальных экологических проблем в условиях глобального изменения климата и усиления антропогенной нагрузки. В аридных и полуаридных регионах процессы оголения почв, эрозии и опустынивания происходят особенно интенсивно, что приводит к снижению продуктивности земель и нарушению устойчивости экосистем.

Республика Таджикистан характеризуется сложным горным рельефом и значительной климатической изменчивостью. В последние десятилетия наблюдается повышение температуры воздуха и уменьшение количества осадков, что усиливает процессы деградации почвенного покрова [1].

Бассейн реки Кафарниган имеет важное значение для водоснабжения, сельского хозяйства и экосистем региона. Однако интенсивное землепользование, включая сельскохозяйственную деятельность и выпас скота, способствует ухудшению состояния почв.

Современные методы дистанционного зондирования Земли позволяют эффективно отслеживать изменения природных объектов. Индекс оголённой почвы (BSI) широко применяется для выявления участков с открытым грунтом и оценки деградационных процессов [2].

Целью данного исследования является оценка пространственного распределения деградации почв в бассейне реки Кафарниган с использованием индекса BSI. Исследование включает анализ пространственно-временной динамики BSI, выявление зон эрозии, опустынивания и риска лесных пожаров, а также сопоставление с климатическими и экологическими параметрами для разработки рекомендаций по устойчивому управлению земельными и водными ресурсами.

Материалы и методы

Для проведения исследования использованы спутниковые данные Landsat и Sentinel за 2000, 2010, 2020 и 2024 годы. Обработка данных осуществлялась с применением геоинформационных систем и методов пространственного анализа.

Индекс оголённой почвы (BSI) представляет собой спектральный показатель, позволяющий выделять участки с минимальным растительным покровом. Он рассчитывается на основе отражательной способности в различных спектральных диапазонах.

Высокие значения индекса BSI соответствуют открытым почвам, в то время как низкие значения указывают на наличие растительности. Он эффективно выделяет оголённые почвы даже в условиях частичного покрытия растительностью и используется в различных экологических и агроэкологических исследованиях для мониторинга деградации земель, эрозионной активности, засолённости и урбанизации.

Для интерпретации результатов использована следующая классификация значений BSI:

- 0.42–0.50 — крайне высокое оголение
- 0.34–0.42 — очень высокое
- 0.26–0.34 — высокое
- 0.18–0.26 — среднее
- 0.10–0.18 — низкое

Пространственный анализ позволил выявить закономерности распределения деградации почв в пределах исследуемой территории.

Результаты

Анализ карты показал выраженную пространственную неоднородность распределения значений индекса BSI. Северные горные районы характеризуются низкими значениями индекса, что свидетельствует о наличии устойчивого растительного покрова и минимальном уровне деградации почв.

Южные и предгорные территории демонстрируют высокие и очень высокие значения BSI, что указывает на значительное оголение почв и развитие деградационных процессов. Эти районы подвержены интенсивному сельскохозяйственному использованию и неблагоприятным климатическим условиям.

Наиболее проблемные зоны сосредоточены в нижнем течении бассейна, где наблюдаются процессы эрозии, истощения почв и сокращения растительного покрова.

Переходные зоны характеризуются средними значениями индекса, что отражает частичное сохранение растительности и умеренную степень деградации.

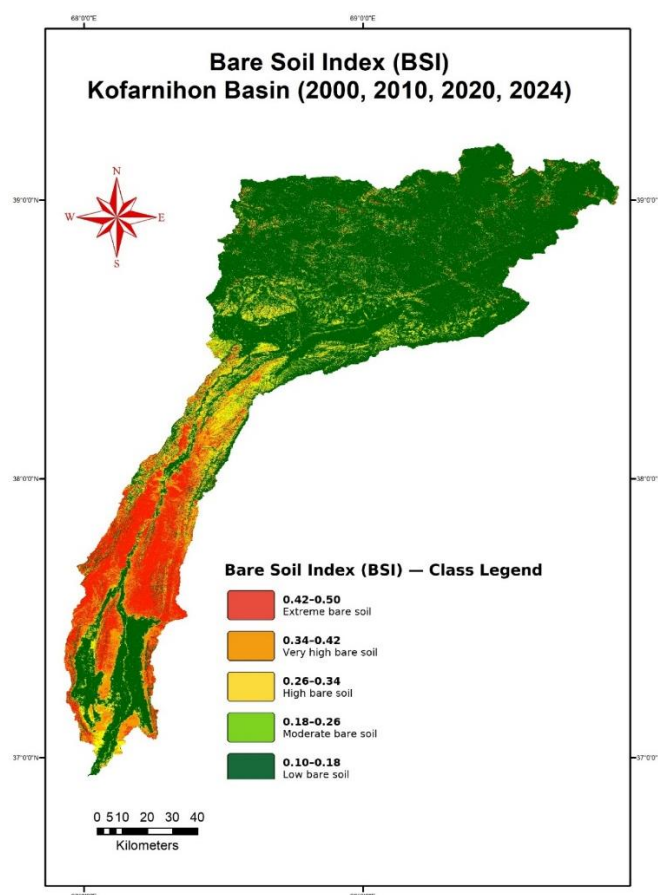


Рисунок 1 -Пространственное распределение индекса оголённой почвы (BSI) в бассейне р. Кафарниган (2000, 2010, 2020, 2024 гг.)

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что деградация почв в бассейне реки Кафарниган обусловлена как природными, так и антропогенными факторами.

Климатические изменения, включая повышение температуры и снижение количества осадков, способствуют иссушению почв и снижению растительного покрова. Это приводит к увеличению площади оголённых территорий [3].

Антропогенная деятельность, включая сельское хозяйство и выпас скота, усиливает процессы деградации. Высокие значения BSI в южных районах свидетельствуют о значительном воздействии хозяйственной деятельности.

Результаты исследования согласуются с международными исследованиями, в которых индекс BSI используется как эффективный инструмент для мониторинга деградации земель [4].

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что индекс оголённой почвы (BSI) является эффективным инструментом для оценки деградации почвенного покрова.

Выявлено, что северные районы бассейна характеризуются низким уровнем деградации, тогда как южные территории наиболее подвержены оголению почв.

Пространственное распределение индекса BSI отражает влияние климатических условий и антропогенной нагрузки.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки мер по устойчивому управлению земельными ресурсами и предотвращению деградации почв.

Список литературы

1. World Bank. Climate change and land degradation.
2. Huete A. Remote sensing of vegetation indices.
3. Tucker C.J. Remote sensing of vegetation.
4. GFDRR. Disaster risk management.

[DOI 10.5281/zenodo.20225567](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225567)

ИҚЛИМ ЎЗГАРИШИ ШАРОИТИДА ЎЗБЕКИСТОННИНГ АРИД ХУДУДЛАРИДА СУВ МУАММОЛАРИНИ БАРТАРАФ ЭТИШ СТРАТЕГИК ЕЧИМЛАР

Мурадов Шухрат Одилович,

Марказий Осиё атроф-муҳит ва иқлим ўзгаришини ўрганиш университети (Греэн Университй) хузуридаги Атроф-муҳит ва табиатни муҳофаза технологиялари илмий-тадқиқот институте директори, техника фанлари доктори, профессор, Ўзбекистонда “Energy Globe” халқаро фондининг вакили. m.oikos@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Кўп йиллик (1975–2025) тадқиқотлар асосида долзарб таълимий ва илмий сув хўжалиги муаммолари мажмуаси аниқланган, иқлим ўзгариши даврида арид хуудларда экология фанини ўқитиш сифати ҳамда сув–ер ресурслари ҳолатини яхшилаш бўйича инновацион тавсиялар берилган.

Калит сўзлар: Сув, ер, экология, суғориш, таълим, деминерализация, субирригация, мелиорация, метаморфизация (кимёвий таркиб), сизот сувларини изоляция қилиш, чорвачилик, унумдорлик.

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРИДН ЫХ ЗОН УЗБЕКИСТАНА И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПЕРИОД ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

АННОТАЦИЯ

На основе многолетних (1975-2025) исследований выявлен комплекс неотложных образовательных и научных эколого-водохозяйственных проблем, даны инновационные рекомендации по улучшению качества изучения предмета экология и состояния водно-земельных ресурсов аридных территорий в период изменения климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Вода, земля, экология, орошение, образование, деминерализация, субирригация, мелиорация, метаморфизация, изоляция грунтовых вод, животноводство, плодородие.

WATER MANAGEMENT PROBLEMS IN THE ARID REGIONS OF UZBEKISTAN AND STRATEGIC SOLUTIONS UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

ABSTRACT

On the basis of long-term (1975-2025) studies, a set of urgent educational and scientific ecological and water management problems was revealed, and recommendations were given to improve the quality of studying the subject of ecology and the state of water and land resources in arid territories during climate change.

Keywords: Water, land, ecology, irrigation, education, demineralization, subirrigation, reclamation, metamorphization, groundwater isolation, livestock farming, fertility.

КИРИШ

Ўзбекистон — экологиянинг тарихий бешиги

Тарихан Ўзбекистон экологиянинг ватани ҳисобланади. Буни шундан билиш мумкинки, бундан 3000 йил аввал, яъни эрамиздан аввалги VII асрда, бизнинг аجدодларимиз — аниқроғи хоразмийлар биринчи марта улуг асар — «Авесто» китобини яратганлар. Ушбу китобнинг мазмуни қуйидаги ғоя билан сингдирилган: инсон ўзини ҳар доим пок сақлаши, ўсимликларни асраб-авайлаши, ер, сув ва ҳавонинг муҳофаза қилиши шарт [1].

Биз бундай ҳулосага нега келамиз? Чунки инсон экологиянинг асосий субъекти, китобда тилга олинган ушбу уч муҳим табиат унсурлари — экологиянинг фундаментал тушунчаси бўлган биогеоценоз (ёки экотизим) асоси, аниқроғи «биотоп»ни ташкил этади. Биотоп эса ўз навбатида «климатоп» (ҳаво, атмосфера), «гидротоп» (сув, гидросфера) ва «эдафатоп» (тупроқ ва тупроқ-грунт) элементларидан иборат [2]. Бу борада Абу Райҳон Беруний берган огоҳлантирувчи фикр бугунги кунда ҳам долзарб: «Инсон табиат қонунларини кўпол равишда бузса, шундай мудҳиш оқибатларга дуч келадики, уларни тўхтатишга ҳеч қандай куч қодир бўлмайди.» [3]

Бугунги кунда экология жадал суръатларда ривожланаётган фан сифатида эътироф этилади. У жамият ҳаётида ҳам, инсон фаолиятида ҳам алоҳида стратегик аҳамиятга эга. Президентимиз таъкидлаганидек: «...республикада экология билан боғлиқ жиддий масалалар етарлича чуқур ўрганилмаяпти» («Халқ сўзи», 16.01.2017, с.2). Шунини алоҳида қайд этиш жоизки, бундай вазиятнинг шаклланишига сабаб — экологик таълим ва тарбия даражасининг етарлича юқори бўлмаслиги, аҳолининг экологик маданияти пастлигидир (видеоселектор йиғилиши, 02.02.2022 й.). Бу Президент томонидан белгиланган устувор вазифалардан биридир. Мазкур талаб Ўзбекистон Республикаси «Табиатни муҳофаза қилиш тўғрисида»ги қонунида ҳам мустаҳкамланган бўлиб, унда «...барча турдаги таълим муассасаларида экологик таълимни таъминлаш» зарурлиги кўрсатиб ўтилган (4-модда, 3-банд) [4]. Замонавий илмий қарашларда маълумки, инсон тафаккурининг шаклланиши ўзини англаш жараёни билан боғлиқ бўлиб, бу борада Сукротнинг қуйидаги фикри кенг танилган: «Бошқаларни ўргатиш осон, аммо ўзини англаш мушкулдир» [5].

Тадқиқотнинг мақсади. Қайд этиш жоизки, Марказий Осиёда Ўзбекистон суғориладиган деҳқончилик ривожланган энг қадимий цивилизациялардан бири ҳисобланади. Бунга С.П. Толстов томонидан олиб борилган археологик қазилмалар ва тадқиқотлар далилдир. Ушбу илмий изланишлар натижалари Амударё дельтасида ирригация тармоғи эрамиздан аввалги

VII асрдан эрамизнинг III асригача бўлган даврда энг юқори тараққиёт босқичига эришганини кўрсатади [6].

XIX аср охирида йирик рус климатологи А.И. Воеиков қуйидагича хулоса қилган: «...Осиёнинг қурғоқчил ҳудудлари (яъни Туркистон) инсон ҳаёти ва фаолияти учун, албатта, суғориш тизими йўлга қўйилган тақдирда, АҚШнинг қўплаб ҳудудларига нисбатан анча қулайдир.» [7]

Тадқиқотчи Свенсон шундай таъкидлайди: «Сув тугаган жойда ҳаёт ҳам тугайди — бу ўзбекларда қадимдан мавжуд ҳикматдир.» [8]. Ушбу эътироф шундан далолат берадики, агар Қуёш Ер юзидаги барча тирикликнинг «отаси» бўлса, сув қўплаб олимлар фикрига кўра, ҳаётни юзага келтирган «она бағри» — ҳаёт шаклланишининг бошланғич муҳити ҳисобланади.

Статистик маълумотларга кўра, 2023 йилда аллақачон 2 миллиардга яқин инсон, яъни сайёра аҳолисининг тахминан 25 фоизи, тоза ичимлик суви етишмовчилиги ҳолатида яшайди, келгуси ўн йиллик давомида эса яна 700 миллион киши ушбу тоифадаги аҳолига қўшилиши прогноз қилинмоқда [9].

Ҳозирги кунда инсоният фойдаланаётган чучук сув ресурсларининг тахминан 80 фоизи ирригация эҳтиёжлари учун сарфланаётганини эътироф этиш лозим [10].

Халқаро озиқ-овқат сиёсати институтининг баҳолашларига кўра, 2030 йилга бориб суғориладиган ерлар майдони 20 фоизга, сув истеъмоли эса 14 фоизга ошиши прогноз қилинмоқда. Зеро, суғориладиган майдонлар жаҳон озиқ-овқат ишлаб чиқаришининг тахминан ярмини таъминловчи асосий ресурс ҳисобланади [11].

Шу муносабат билан ушбу тадқиқотнинг асосий мақсади — Президент ва Ҳукумат томонидан илгари сурилган ташаббус ва қарорларни ҳаётга татбиқ этиш бўйича инновацион техник тавсияларни илмий асосда ўрганиш ва ишлаб чиқишдан иборатдир.

Тадқиқот натижалари. Мазкур тадқиқотларда кўтарилган экологик барқарорлик ва сув ресурсларидан фойдаланишнинг долзарб муаммоларини бартараф этиш бўйича Атроф-муҳит ва табиатни муҳофаза қилиш технологиялари илмий-тадқиқот институти олимлари томонидан 75 йилдан ортиқ вақт давомида комплекс илмий изланишлар олиб борилмоқда. Юқори илмий салоҳият, кўп йиллик тажриба, тажриба-синов ишлари натижаларига таянган ҳолда, ушбу йўналишда шаклланган илмий-амалий ечимлар Марказий Осиё минтақасида ва дунёнинг кенг арид ҳудудларида қўллаш учун концептуал, иқтисодий ва технологик жиҳатдан асосланган таклифлар мажмуасини илгари суриш имконини бермоқда.

Биринчидан, маълумки, турли саноат тармоқларида илмий-техник сиёсатнинг амалга оширилиши асосан махсус экологик тайёргарликка эга бўлмаган муҳандислик-техник ходимлар томонидан олиб борилади. Мазкур ҳолат олий таълим муассасаларининг техник, технологик, иқтисодий ҳамда ижтимоий-гуманитар йўналишларда таҳсил олаётган талабаларига ҳам тааллуқлидир. Шу муносабат билан, биологик бўлмаган таълим йўналишлари учун тайёрланган «Экология» дарслигини кенг қўламда жорий этишни тавсия этамиз [12].

Иккинчидан, аҳолига мўлжалланган чучук сув ресурсларига келсак, уларни илмий асосланган, оқилона бошқариш шароитида Ўзбекистоннинг узоқ муддатли истиқболи учун етарли сув захиралари мавжуд. Бунга, аввало, Фарғона водийси, Тошкент олди ҳудуди, Жиззах зонаси, Зарафшон водийси, Қашқадарёдаги Китоб-Шаҳрисабз ботиқлиги ҳамда Сурхондарё ҳавзасидаги ер ости чучук сув ресурслари киради.

Ушбу омилларни инобатга олган ҳолда, Ўзбекистон бўйича ягона марказлашган водопровод тизимини яратиш (электр ва газ тармоқлари сингари) мақсадга мувофиқ деб ҳисоблаймиз.

Учинчидан, агар биз Марказий Осиё минтақасида сув барқарорлигини ва кенг маънода барқарор ривожланишни таъминлашни истасак, бугуноқ барча йирик саноат корхоналарини, жумладан истиқболда режалаштирилган атом электр станцияларини ҳам ер ости ва ер усти манбаларидаги шўр сувларнинг қайта ишланган турларига ўтказиш зарурати кун тартибиди. Ушбу йўналишда ишлаб чиқилган ва синовдан ўтказилган газогидрат технологиясига асосланган сувларни деминерализация қилиш қурилмаси [15] экологик ва иқтисодий самарадорлик мезонларига жавоб берувчи инновацион технология сифатида эътироф этилган. Бугунги кунда шўр ер ости сувларининг ҳажми [16] ҳамда коллектордан-дренаж сувларининг кўлами ортиб бормоқда, уларнинг улуши умумий сув олиш ҳажмининг 30 фоизини ташкил этади. Коллектор ва дренаж сувларининг тўпланиши натижасида Ўзбекистонда Сичанкул (600 млн м³ дан ортиқ), Ачинкул (126 млн м³ дан ортиқ), Арнасай кўллари тизими (30 млрд м³ дан ортиқ) ҳамда Қорақалпоғистон ва қўшни Қозоғистон ҳамда Туркманистон ҳудудларидаги Орол бўйи ҳудудида кўплаб сунъий шўр кўллари шаклланиган. Бу сув ресурсларининг умумий ҳажми миллиардлаб куб метрларни ташкил этади.

Тўртинчидан, тан олиш лозимки, ҳозирги даврда гидрологик ва метеорологик қурғоқчилик жараёнлари билан бир қаторда тупроқ қурғоқчилиги ҳодисасининг кучайиши кузатишмоқда. Табиий равишда, 2023 йил кузатишган жараён 2025 йилда ҳам давом этди — интенсив буғланиш натижасида суғориш меъёрларининг ошишига, бу эса ўз навбатида тупроқ қурғоқчилигини кучайтириши мумкин бўлган ҳолатга олиб келди. Ўринсиз сув сарфини камайтириш ва самарадорлигини ошириш мақсадида, биз кенг қўлланилаётган гиперригация тизими билан бир қаторда субирригацияни таъминловчи махсус қурилмаларни (17, 18, 19) оммавий тадбиқ этишни ниҳоятда муҳим чора деб ҳисоблаймиз. Мазкур технологиянинг каскадли жорий этилиши сув меъерини 1,5–2 барабар қисқартириш имконини беради.

Бешинчидан, қурғоқчилик ҳолатларининг кўпайиши шароитида суғориш мақсадларида ер ости сувларидан фойдаланиш ҳажмининг ошиши кузатишмоқда, бу эса ер ости сув захираларининг қисқаришига ва сизот сувлар сатҳининг критик чуқурликдан пастга силжишига олиб келмоқда. Айрим ҳудудларда — Навоий, Самарқанд, Жиззах, Қашқадарё, Наманган, Фарғона ва Андижон вилоятларида — сизот сув сатҳи 5 метр чуқурликкача пасайгани кузатишмоқда.»

Мазкур ҳолат гидрогеологик ўтказувчан зоналар (гидрогеологик «ойналар») орқали сизот сувларнинг пастга йўналган оқими кучайиши билан боғлиқ. Ушбу нохуш жараённи бартараф этиш мақсадида суғориладиган ер майдонларида сизот сувларини изоляция қилишга қаратилган технологик ечимлар [20–23] таклиф этилмоқда.

Олтинчидан, тупроқдан намликнинг буғланиш кўрсаткичини камайтириш, энергия тежамкорлигини таъминлаш ва тупроқ унумдорлигини оширишга қаратилган зарур технология таклиф этилади. Мазкур технологиянинг илмий моҳияти гидрогель моддалардан фарқли равишда физик ҳолати ўзгарадиган маҳаллий гиллардан фойдаланишга асосланади. Ушбу технологияни, хусусан, Оролбўйи ҳудудида 2 миллион гектар майдонда барпо этилаётган ўрмонзорларни томчилатиб суғоришда қўллаш мақсадга мувофиқ ҳисобланади.

Шу муносабат билан “Тупроқ мелиорацияси усули” [24] ишлаб чиқилган бўлиб, у маҳаллий табиий минераллар — вермикулит, перлит ва бошқа компонентлардан фойдаланишга

асосланади. Уларнинг қўлланилиши тупроқ унумдорлигини оширади ҳамда тупроқ юзасидан физик буғланишини камайтиради.

Еттинчидан, ҳосилдорликни оширишнинг асосий омили сув эмас, балки тупроқнинг табиий унумдорлиги экани илмий жиҳатдан тасдиқланган. Тадқиқотлар чорвачилик ва ер унумдорлиги ўртасида бевосита ўзаро боғлиқлик мавжудлигини кўрсатади. Масалан, 40 бош қўй томонидан ҳосил қилинадиган органик ўғит бир гектар майдоннинг унумдорлигини таъминлай олади, шу каби натижа 5–6 бош қорамолдан олинган органик моддаларда ҳам кузатилади. Ўзбекистон Республикасида мавжуд 4,3 миллион гектар суғориладиган ерлар ҳисобга олинганда, тўлиқ органик таъминот учун 172 миллион бош қўй ва эчки мавжуд бўлиши талаб этилади. 2022 йил статистик маълумотларига кўра, қўй ва эчкиларнинг умумий сони 22626,3 минг бош, қорамол (КРС) — 12611,8 минг бошни ташкил этган бўлиб, жами 35238,1 минг бош чорва мавжуд, бу эса суғориладиган ерларнинг атиги 63 фоизини органик ўғит билан таъминлайди. Агар республиканинг 20,3 миллион гектар қишлоқ хўжалиги майдонлари ҳисобга олинса, органик таъминланганлик даражаси атиги 13,3 фоизни ташкил қилади. Бундай ҳолатнинг оқибати кўриниб турибди — табиий унумдорлик етарли эмас, натижада гўшт ва сут маҳсулотлари таъминоти етишмайди.

Бундан ташқари, тупроқ унумдорлигининг муҳим кўрсаткичи бўлган ерларнинг бонитет бали пасайган: Ўзбекистон бўйича ўртача кўрсаткич 55 балл, Қорақалпоғистон Республикасида эса 41 балл (БМТ маълумотлари [25]). Бу ҳолат ҳосилдорликнинг сезиларли пасайишига олиб келган. Табиий экотизимнинг бузилиши натижасида экологик хавфнинг кескин кучайиши кузатилмоқда.

Саккизинчидан, замонавий шароитда ер усти ва ер ости сувларининг сифатини баҳолаш ва уларнинг узок муддатли истиқбол бўйича прогнозини амалга ошириш зарур. Бунинг учун табиий сувларнинг кимёвий таркибининг метаморфизациясини (ўзгаришини) таҳлил қилиш лозим [26]. Ҳозирги вақтда тоғ олди ҳудудларида локал содали шўрланиш кузатилмоқда. Илмий жиҳатдан исботланганидек, агар улар суғориладиган майдоннинг 20-30 фоизини ташкил қилса, бундай майдонлар иқтисодий жиҳатдан самарасиз ҳисобланади. Содали шўрланишнинг олдини олиш мақсадида биз тупроқларни шўрсизлантириш усулини таклиф этамиз [27] ва у кимёвий мелиорация жараёнида ўсимликлар учун зарур бўлган чили селитрасининг ажралиб чиқишига хизмат қилади.

Тўққизинчидан, Афғонистонда Куштепа каналининг қурилиши муносабати билан Амударё сувининг камайиши эҳтимоли юзасидан XVII аср охирида муҳандис Анненков томонидан Амударё сувининг оқим бўйича табиий равишда Бухоро шарқий қисмига ва Қашқадарё тизмасининг қуйи ҳудудларига етиб бориши мумкинлиги тасдиқланган [7]. Шу муносабат билан биз Вахш дарёдан (Тожикистон ҳудудида) Қарши магистрал каналигача узунлиги 500 км дан ортиқ бўлган канал қурилиши таклиф этамиз. Бу орқали Ўзбекистоннинг жануби-ғарбий ҳудудлари — Сурхондарё, Қашқадарё, Бухоро ва Навоий вилоятларини сув билан таъминлаш мумкин бўлади.

Ўнинчидан, юқорида қайд этилган инновацион ечимлар сув ресурсларини такомиллаштирилган интеграциялашув бошқариш технологиясини яратишга, жаҳон тажрибасига мос ҳолда хизмат қилади [28–35]. Уларни агро хўжалик участкалари, йирик саноат корхоналари, туман ва вилоятлар, дарё ҳавзалари даражасида жорий этиш лозим. Бизда ҳисоб-китоблар, тажрибалар ўтказиш ва ишлаб чиқариш шароитида жорий этиш бўйича етарли амалий тажриба мавжуд [36].

Ўн биринчидан, мавжуд, фойдаланилаётган ва оқова сувларни аниқ ҳисобга олиш учун гидрометрик тармоқни қайта тиклаш зарур.

Ўн иккинчидан, сув ресурсларининг асосий манбаи бўлган дарёларни тартибга келтириш ва уларни экологик ҳолатини яхшилаш ниҳоятда муҳим, чунки улар ҳудуднинг иқлим шароитига бевосита таъсир этади. Бунинг учун мамлакатимизда гидрология илмий мактаби етарлича ривожланган.

ХУЛОСА

Таъкидлаш жоизки, илгари сурилган барча таклифлар лаборатория ва дала шароитида синовдан ўтказилган, илмий жамоатчилик томонидан апробация қилинган ва Россия, АҚШ, Европа мамлакатлари, Туркия, Қозоғистон, Тожикистон ҳамда Туркменистон олим-мутахассислари томонидан маъқулланган. Таклиф этилаётган техник ечимлар экологик ва иқтисодий жиҳатдан мақсадга мувофиқ бўлиб, уларни босқичма-босқич амалий жорий этишга тўлиқ тайёр.

Биз умид қиламизки, «Экология» фанини замонавий ёндашув асосида ўқитиш ва келтирилган техник инновациялар мажмуаси олий таълим муассасаларининг тегишли бўлинмалари, сув хўжалиги ташкилотлари, аграр кластерлар, томорқа эгалари, соҳавий вазирлик ва идоралар ҳамда амалиётчи мутахассислар томонидан мазкур йўналишда «стратегия» ни ишлаб чиқиш жараёнида инобатга олинадиган ва ҳаётга татбиқ этилади. Бу эса Ўзбекистоннинг таълим сектори, экологик ва ижтимоий муҳитини яхшилашга, шунингдек, озиқ-овқат хавфсизлигини таъминлашга хизмат қилади. Натижалар нафақат мамлакатимиз, балки бутун арид минтақа учун ҳам стратегик аҳамиятга эга бўлади.

Фойдаланилган адабиётлар

1. АВЕСТО. Историко-литературное наследие. Пер.на узб. яз. Аскар. — Махкам. Ташкент: «Шарк», 2001. 384 с.
2. Валукоис Г.Ю., Мурадов Ш.О. Основы экологии-Т.1.Общая экология. Кн.1. Ташкент: «Мехнат», 2001. 328 с.
3. Тухтаев А.С. Экология. Ташкент: Укитувчи, 1998. 192 с.
4. Закон Республики Узбекистан «Об охране природы». Ташкент: Адолат, 1992. 14 с.
5. Нерсисянц В.С. Сократ. М.: Издательская группа ИНФРА. -М-НОРМА, 1995. 312 с.
6. Толстов С.П. Древний Хорезм. М.:16-я тип. треста «Полиграфкнига», 1948. 352 с.
7. Мамедов А.М. Развитие ирригации в Узбекистане. Ташкент: «ФАН», 1967. 297 с.
8. Петер Свансон. Ватер: Тхе Дроп оф Лифе, Нортх Ворд пресс, Миннетонка, Миннесота, 2001. УСА. П.143.
9. Усманий С. Угрозы нехватки воды: Пешения непропорциональны проблемам//АГУА, УЗСУВТАМИНОТ, 2023. №24/7. С. 39-41.
10. Вышпольский Ф., Мухамеджанов Х. Опыт использования лизиметров для корректировки режимов орошения сельскохозяйственных культур//Сб.науч.трудов.Материалы международного семинара ИКАРДА. Тараз:2002. С.139-149.
11. Савельев Ю.В. Экологический менеджмент. М.: Логос, 2001. 126 с.
12. Мурадов Ш.О. Экология. -Карши: изд-во «Интеллект», 2022. 376 с.
13. Мирзаев С.Ш. Запасы подземных вод Узбекистана. Ташкент: ФАН, 1974. 224 с.
14. Закон Республики Узбекистан «О воде и водопользовании». Ташкен: Адолат, 1993. 30 с.

15. Патент Республики Узбекистан № ИДП 04339. 2000.
16. Борисов В.А., Вавленко Л.И., Мусаева Т.П., Султанова Д.Г. Индексная оценка качества питьевых подземных вод Узбекистана// Проблемы питьевого водоснабжения и экологии. Ташкент: изд-во «Университет», 2002. С.83-91.
17. Авторское свидетельство № 990952. 1980.
18. Авторское свидетельство № 1491953. 1989.
19. Авторское свидетельство № 1656053. 1991.
20. Авторское свидетельство № 1076533. 1983.
21. Авторское свидетельство № 1079754. 1984.
22. Авторское свидетельство № 1620536. 1990.
23. Авторское свидетельство № 1659445. 1991.
24. Патент Республики Узбекистан № 4539. 19.97
25. Обзор результативности экологической деятельности. Узбекистан, втор. обзор, вып.№29- Нью-Йорк и Женева: ЕЭК ООН. 2010. 245 с.
26. Валуконис Г.Ю., Ходьков А.Е. Роль подземных вод в формировании месторождений полезных ископаемых. Л.: «Недра», 1978. 296 с.
27. Патент Республики Узбекистан № ИДП 04470. 2000.
28. Биндраа С.П., Хамид А., Салем Х., Хамуда К., Абулифа С. Сустайнабле интегрated water ресоурсэс манагемент фор энергй продустион анд фодд сесуритй ин Либя. Просэдиа Течнологй 12 (2014) пп. 747–752, дои: 10.1016/ж.протсй.2013.12.558.
29. Савениже Х.Г., Ван П. дер Зааг, Интегрated water ресоурсэс манагемент: Сонсэптс анд иссуэс. Пхйсисс анд Чемистрй оф тхе Эартх 33 (2008) пп. 290–297, дои: 10.1016/ж.псэ.2008.02.003.
30. Хиао-Жун Ху, Ёу-Саи Хiong, Ёнг-Жин Ли, Жиан-Хин Ванг, Фенг-Мин Ли, Хаи-Янг Ванг, Лан-Лан Ли, Интегрated water ресоурсэс манагемент анд water усерсь ассоиатионс ин тхе арид регион оф нортхвэст Чина: А сасе студй оф фармерсь персэптионс. Жоурнал оф Энвиронментал Манагемент 145 (2014) пп. 162-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.018>.
31. Дукховний В.А., В.И. Цоколов, Д.Р. Зиганшина, Интегрated Water Ресоурсэс Манагемент ин Сэнтрал Ациа, ас а вай оф сурвивал ин сондитионс оф water ссарситй. Куатернарий Интернационал 311 (2013) пп. 181-188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.07.003>.
32. Гоурбесвилле Р., Чалленгес фор интегрated water ресоурсэс манагемент. Пхйсисс анд Чемистрй оф тхе Эартх 33 (2008) пп. 284–289. дои:10.1016/ж.псэ.2008.02.002.
33. Пирес А., Морато Ж., Пеихото Х., Ботеро В., Зулуага Л., Фигуэроа А. Сустайнабилити Ассесмент оф индисаторс фор интегрated water ресоурсэс манагемент. Ссиенсэ оф тхе Тотал Энвиронмент 578 (2017) пп. 139–147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.217>.
34. Роач Т., Капелан З., Ледбеттер Р. Сомпарисон оф инфо-гап анд робуст оптимисатион метходс фор интегрated water ресоурсэ манагемент ундер севере унсэртаинтй. Просэдиа Энгинеэринг 119 (2015) пп. 874–883. дои: 10.1016/ж.проэнг.2015.08.955.
35. Анзалди Г., Рубион Э., Сорчеро А., Санфелиу Р., Доминго Х., Пижуан Ж., Терса Ф. Тowaрдс ан Энхансэд Кноуледже-Басед Десисион Суппорт Сйстем (ДСС) фор Интегрated Water Ресоурсэ Манагемент (IWPM). Просэдиа Энгинеэринг 89 (2014) пп. 1097 – 1104. дои: 10.1016/ж.проэнг.2014.11.230.

36. Мурадов Ш.О. Научное обоснование водоустойчивости аридных территорий юга Узбекистана. Ташкент: ФАН, 2012. 376 с.

[DOI 10.5281/zenodo.20231217](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231217)

SUV XO'JALIGI OBYEKTLARIDAGI SUV RESURLARINI OPTIMAL BOSHQARISH USULINI ANIQLASHTIRISH

Seytov Aybek Jumabayevich¹ Haydarova Roziya Davronovna²

¹Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya university

²Termiz davlat Universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqolada optimallikning zaruriy shartiga asoslangan asosiy optimallashtirish usullari, optimallik me'zoni etib tanlangan qaralayotgan funksionalning boshqaruv variatsiyasining birinchi hosilasini yoki gradiyentini aniqlash masalasi qarang. Shuning bilan birga iste'molchilarga suvni iqtisod qilgan holda yetkazib berish sharoitida suv xo'jaligi obyektlaridagi suv resurslarini optimal taqsimlash masalasi optimalligining zaruriy shartida qo'llaniladigan usullarning tahlili keltirilgan.

Kalit so'zlar: optimallik me'zoni, ko'ndalang, bo'ylama, variatsiya, Gradiyent usuli, maksimal, boshqaruv.

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные методы оптимизации, основанные на необходимом условии оптимальности, а также задача определения первой производной или градиента управляющей вариации рассматриваемого функционала, выбранного в качестве критерия оптимальности. Одновременно представлен анализ методов, используемых в необходимом условии оптимальности задачи оптимального распределения водных ресурсов в водохозяйственных объектах в условиях экономического водоснабжения потребителей.

Ключевые слова: критерий оптимальности, поперечный, продольный, вариация, градиентный метод, максимум, управление.

Annotation. This article examines the main optimization methods based on the necessary optimality condition, as well as the problem of determining the first derivative or gradient of the control variation of the functional under consideration, selected as the optimality criterion. An analysis of the methods used in the necessary optimality condition for the problem of optimal water resource allocation in water management facilities under conditions of economical water supply to consumers is also presented.

Key words: optimality criterion, transverse, longitudinal, variation, gradient method, maximum, control.

Kirish. Masalaning asosiy maqsadi suv xo'jaligi obyektlari hududida ko'ndalang va bo'ylama yo'nalishlarda suv resurslari tezligining o'zgarishini maksimal darajada oshirishdir:

$$I = \left(\int_0^T \int_0^L [u(x,t) - u^*(x,t)]^2 dx dt + \int_0^T \int_0^M [v(y,t) - v^*(y,t)]^2 dx dt \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

Quyidagi shartlarda

$$\begin{cases}
 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + i = 0, \\
 \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial x} = gh(S_{ax} - S_{fx}), \\
 \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial y} = gh(S_{ay} - S_{fy}). \\
 U(x, y, t_0) = U_0(x, y), \quad (x, y) \in \Omega, \\
 h_i(x, y, t) = H_i(t), \\
 q_i(x, y, t) \cos \alpha + p_i(x, y, t) \sin \alpha = Q_i(t), \\
 \alpha = (n, Ox), \quad (x, y) \in d\Omega_{\text{жи}} \quad i = 1, n_{\text{ж}}
 \end{cases}
 \quad (2)$$

boshqaruv ta'siri ostida:

$$\begin{aligned}
 u(0, t) &= u_1(t), & u(L, t) &= u_2(t), \\
 v(0, t) &= v_1(t), & v(M, t) &= v_2(t),
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

obyekt uchastkalarining ishlash rejimlariga cheklovlar quyidagicha bo'ladi:

$$u_{\min} \leq u(x, t) \leq u_{\max}, \quad v_{\min} \leq v(y, t) \leq v_{\max}. \quad (4)$$

Optimallikning zaruriy sharti. Ko'rib chiqilayotgan (1)-(2) masala uchun cheklovlarning ichki sohasini boshqarishda optimallik me'zoni variatsiyasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi.

$$\begin{aligned}
 \delta I = & \int_0^L [u(x, T) - u^*] \delta u(x, T) dx + \int_0^M [v(x, T) - v^*] \delta v(x, T) dy - \\
 & - \int_0^T \left\{ \left[\left(\frac{\partial u}{\partial u_1} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial u_2} \right) \right] \delta u_2(t) + \left(\frac{\partial u}{\partial u_1} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial u_2} \right) \delta u_1(t) \right\} dt, \quad (1.40)
 \end{aligned}$$

bu yerda $u = \lambda^1 S_{ay} + \lambda^2 S_{fy}$.

u gamiltonian hosilasini u_1 bo'yicha hisoblaymiz.

$$\frac{\partial u}{\partial u_1} = gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial u_2} = gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial v_1} = gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial v_2} = gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \quad (8)$$

$\delta u_1(t), \delta u_2(t)$ boshqaruv variatsiyasidan funksional variatsiyalarining oshkor ifodalari aniqlandi. Ushbu variatsiyalar ixtiyoriy deb olingan va bu variatsiyalarda ifodalarning nolga tengligi optimallikning zaruriy sharti hisoblanadi.

Shunday qilib, Sen-Venan tenglamalari sistemasi uchun optimallikning yakuniy zaruriy shartlari, cheklovlarning ichki sohalari boshqaruvida quyidagi shaklga ega:

$$\left[gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \right]_{x=0} \left(\frac{\partial u}{\partial u_1(t)} \right)_0 = 0, \quad (9)$$

$$\left[gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \right]_{x=L} \left(\frac{\partial u}{\partial u_2(t)} \right)_0 = 0. \quad (10)$$

$$\left[gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \right]_{y=0} \left(\frac{\partial v}{\partial v_1(t)} \right)_0 = 0, \quad (11)$$

$$\left[gh\lambda^1 - gh\lambda^2 \right]_{y=M} \left(\frac{\partial v}{\partial v_2(t)} \right)_0 = 0. \quad (12)$$

Tadqiqot usullari. Quyida iste'molchilarga suvni iqtisod qilgan holda yetkazib berish sharoitida suv xo'jaligi obyektlaridagi suv resurslarini optimal taqsimlash masalasi optimalligining zaruriy shartida qo'llaniladigan usullarning tahlilini keltiramiz.

Masalaning taqribiy yechimini olish uchun minimallashtirishning Gradiyent usuli qo'llaniladi.

$$I(u_m(t)) \rightarrow \min; \quad u_m(t) \in H, \quad (13)$$

bu yerda H – gilbert fazosi, minimallashtirish ketma-ketligini qurishga asoslangan. Ushbu ketma-ketlikni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$u_{m+1}(t) = u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t)), t_0 \leq t \leq T, \quad m = 0, 1, 2, \quad (14)$$

bundau₀(t) – boshqaruv ta'sirining ma'lum bir boshlang'ich qiymati, α_m – musbat miqdor, I' – funksional gradiyenti, $u_m(t)$ ning ma'lum qiymati bo'yicha hisoblangan. Agar $I'(u_m(t)) \neq 0$, unda α_m ni $I(u_{m+1}(t)) < I(u_m(t))$ kabi tanlash mumkin.

Optimallik mezonining ikki marta differensiallanishi shartidan

$$I(u_{m+1}(t)) - I(u_m(t)) = \alpha_m (-\|I'(u_m(t))\|^2 + O(\alpha_m)) < 0 \quad (15)$$

ga ega bo'lamiz.

$\alpha_m > 0$ ning barcha yetarlicha kichik qiymatlarida, agar $I'(u_m(t)) \neq 0$ bo'lsa (14) jarayon masalaning berilgan aniqligi qanoatlantirilganda to'xtaydi va kerak bo'lganda $u_m(t)$ funksiya harakatining boshqaruv atrofida optimal boshqaruvga tegishli bo'ladimi yoki yo'qligini aniqlash uchun qo'shimcha tadqiqotlar o'tkaziladi.

α_m . qiymatni tanlashning turli usullari mavjud. Ulardan ba'zilarini keltirib o'tamiz:

1) α_m

$$f_m(\alpha_m) = \inf_{\alpha_m \geq 0} f_m(\alpha_m) = f_{m*}, \quad f_m(\alpha_m) = I(u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t))), \quad (16)$$

shartdan tanlanadi

Gradiyent usulining ushbu varianti *eng tez tushish* usuli deb ataladi.

(14) dan α_m qiymatini aniq aniqlash har doim ham mumkin emas, shuning uchun amalda (14) o'rniga quyidagi shartdan foydalaniladi.

$$f_{m*} \leq f_m(\alpha_m) = f_{m*} + \delta_m, \quad \delta_m \geq 0, \quad \sum_{t=1}^{\infty} \delta_m \leq \infty, \quad (17)$$

yoki

$$f_{m*} \leq f_m(\alpha_m) = (1 - \lambda_m) f_m(0) + \lambda_m f_{m*}, \quad 0 < \lambda \leq \lambda_m \leq 1, \quad (18)$$

Bu yerda λ_m, δ_m kattaliklar (3.4) shartni bajarishdagi xatolikni tavsiflaydi.

2) $\alpha_m = \alpha > 0$ bo'sin, $I(u_{m+1}) < I(u_m)$ monotonlik sharti tekshiriladi va agar kerak bo'lsa, monotonlik sharti bajarilishini ta'minlash uchun α qiymat bo'laklanadi.

3) ba'zan α_m

$$0 < \varepsilon_0 \leq \alpha_m \leq 2/(L + 2\varepsilon), \quad (19)$$

shartlardan aniqlanadi. Bu yerda L – Lipshtits doimiysi; $\varepsilon, \varepsilon_m$ – usulning parametrlari bo'lgan musbat sonlar.

4) α_m ni

$$I(u_m) - I(u_m - \alpha_m I'(u_m)) \geq \varepsilon \alpha_m \|I'(u_m)\|^2, \quad \varepsilon < 0 \quad (20)$$

shartdan tanlash mumkin. Xuddi shunday α_m ni aniqlash uchun odatda $\alpha_m = \alpha$ beriladi va yozilgan tengsizlik bajarilgunicha bo'laklanadi.

5) α_m qiymatlari uchun apriori vazifani quyidagi shartlardan belgilash mumkin:

$$\alpha_m > 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m = 0, \quad \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m^2 < \infty \quad (21)$$

Masalan, $\alpha_m = c(k+1)^{-b}$, $c = \text{const} > 0$, $1/2 < b < 1$ deb olish mumkin. α_m ni bunday tanlovini amalga oshirish oson, lekin monotonlik shartlarini kafolatlamaydi va sekin yaqinlashadi.

6) agar $I_* = \inf I(u_m) > -\infty$, qiymat oldindan ma'lum bol'sa, α_m ni quyidagicha qabul qilish mumkin

$$\alpha_m = I(u_m(t)) - I_* / \|I'(u_m(t))\|^2. \quad (22)$$

Amalda, iteratsiya usullari har qanday shartlar ya'ni, hisobni tugatish me'zoni bajarilgunga qadar davom etadi,. Bu yerda hisobni tugatish me'zonlaridan

$$\|u_m(t) - u_{m+1}(t)\| \leq \varepsilon, \quad u, \quad |I(u_m(t)) - I(u_{m+1}(t))| \leq \delta, \quad u, \quad \|I'(u_m(t))\| \leq \gamma, \quad (23)$$

ham foydalanish mumkin, $\varepsilon, \delta, u, \gamma$ – berilgan sonlar. Ba'zan iteratsiyalar soni ko'rsatiladi.

Natijalar va ularning tahlili. Gradiyent proyeksiyasi usuli boshqaruv funksiyalariga cheklovlar o'rnatilganda masalani taqribiy yechish uchun qo'llaniladi:

$$u_m(t) \in U, \quad (24)$$

bu yerda U -gilbert H fazosidagi yopiq qavariq to'plam.

Gradiyent proyeksiyasi usuli asosida optimallashtirishning maksimallashtiruvchi ketma-ketligi quyidagi qoidaga muvofiq quriladi:

$$u_{m+1}(t) = P_U(u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t))), \quad t_0 \leq t \leq T, \quad m = 0, 1, 2, \quad (25)$$

bunda P_U – boshqaruv sohasidagi loyihalash operatori.

$u_m(t)$ ning U to'plamga proyeksiyasi quyidagicha aniqlanadi.

$$\|u_m(t) - w_m(t)\| = \sup \|u_m(t) - v_m(t)\|. \quad (26)$$

(26) ifoda shuni anglatadiki, agar hisoblangan boshqaruv qiymati U to'plamga tegishli bo'lsa, u holda hisoblangan boshqaruv qiymati qabul qilinadi. Agar hisoblangan boshqaruv qiymati U to'plamga tegishli bo'lmasa, u holda U to'plamga yaqin qiymat olinadi. Bu usulni qo'llash U cheklovlar to'plamiga boshqaruvni proyeksiyalash formulasi mavjud bo'lganda qulaydir.

Agar

$$U = \{u_m(t); u_{\min} \leq u_m(t) \leq u_{\max}\}, \quad (27)$$

bo'lsa, u holda loyihalash operatori quyidagicha aniqlanadi:

$$u_{m+1}(t) = \begin{cases} u_{\min} & \text{npu } u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t)) < u_{\min}, \\ u_{\max} & \text{npu } u_{\min} \leq u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t)) \leq u_{\max}, \\ u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t)) & \text{npu } u_m(t) - \alpha_m I'(u_m(t)) > u_{\max}. \end{cases} \quad (28)$$

Masalaning berilgan aniqligi qanoatlantirilsa, kerak bo'lganda $u_m(t)$ funktsiya harakatining boshqaruv atrofida optimal boshqaruvga tegishli bo'ladimi yoki yo'qligini aniqlash uchun qo'shimcha tadqiqotlar o'tkaziladi.

Xulosa. Ushbu ishda qo'llanilgan, optimallikning zaruriy shartiga asoslangan asosiy optimallashtirish usullari, optimallik me'zoni etib tanlangan qaralayotgan funksionalning boshqaruv variatsiyasining birinchi hosilasini yoki gradiyentini aniqlashga asoslangan.

Suv xo'jaligi obyektlaridagi suv taqsimotini optimal boshqarish masalalari uchun barcha optimallik me'zonlari qavariq funksiyalar bo'lganligi sababli, natijada olingan boshqaruvlar optimal boshqaruvga yaqin hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati.

1. Рахимов Ш.Х., Бегимов И., Сейтов А.Ж. Разработка теории оптимального распределение воды в ирригационных системах в условиях дискретности водоподачи потребителям. Отчет о НИР (промежуточный). –Ташкент: НИИИВП при ТИИМ, 2016.-168С.
2. Ирригация Узбекистана. Том 3 - Ташкент: Фан, 1979.- 358с.
3. Рахимов Ш.Х., Управления системами машинного водоподъема. –Ташкент: Фан, – 1986. – 137с.
4. Рахимов Ш.Х., Гаффоров Х.Ш., Сейтов А.Ж. Математические модели каналов ирригационных систем учитывающие дискретность водоподачи Международная научно-практическая конференция «Научное обеспечение как фактор устойчивого развития водного хозяйства». Докл. - Тараз, 2016 – С:239-245.
5. Рахимов Ш.Х., Гаффоров Х.Ш., Сейтов А.Ж. Математическая модель оптимального распределения воды в каналах ирригационных систем. Международная научно-практическая конференция, посвященной подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни», Докл. – Алмата, 2016 – С. 148-153.
6. Рахимов Ш.Х., Сейтов А.Ж., Жумамуратов Д.К., Рахимова Ф.Ш.// Управление переходными процессами на участке канала между двумя гидротехническими сооружениями, где имеют заборы воды// Доклады международной научно-практической конференции по теме «Инновация в производстве и подготовке технических кадров» Актобе, Республики Казахстан, 2016, с.105-108
7. Рахимов Ш.Х., Гаффаров Х.Ш., Сейтов А.Ж. Алгоритмы оптимального управления распределением воды в каналах ирригационных систем в условиях дискретности водоподачи потребителям, // Мелиорация и водное хозяйство РФ, 2016, №6, С. 6-10.

Optimal management of unsteady water flow in large main canals using artificial intelligence: a case study of the Amu-Zang main canal

Zafar Abdujabborov¹, Nurbek Choriyorov², Olim Abduraxmonov³ Aybek Seytov⁴

¹ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulug'bek, Tashkent, Uzbekistan

² The Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Uzbekistan

³ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulug'bek, Tashkent, Uzbekistan

⁴ University of World Economy and Diplomacy, 54 Mustakillik Ave., Tashkent 100007, Uzbekistan

email: abdujabborov_z@nuu.uz¹, nchoriyorov@gmail.com², abduraxmonovloim915@gmail.com³, a.seytov@uwed.uz⁴

ABSTRACT

Effective management of unsteady flow in large irrigation main canals is a fundamental challenge in arid-zone water resources engineering. The Amu-Zang Main Canal (AZMC), a 312 km gravity-fed system in southern Uzbekistan, presents unique difficulties owing to its high sediment load, frequent demand fluctuations among 23 offtake nodes, and limited telemetry coverage across its lower reaches. This study proposes an integrated artificial intelligence framework combining an ensemble of Temporal Convolutional Networks (TCN) with a Reinforcement Learning (RL) agent trained via Proximal Policy Optimization (PPO) for real-time gate scheduling and discharge regulation. Unlike residual-correction approaches, the TCN ensemble is trained end-to-end to predict multi-step flow states from raw sensor observations, eliminating the dependency on a pre-calibrated physics-based model. The RL agent interacts with the TCN environment model to discover adaptive control policies that minimize both water delivery deficit and sediment-induced scouring risk — a dual objective not addressed in prior canal control studies. The framework is evaluated on three years of operational data (2021-2023) from the AZMC telemetry network. Results show that the TCN ensemble achieves a mean absolute percentage error (MAPE) of 4.7% for 6-hour ahead flow depth forecasting, outperforming persistence (12.3%) and ARIMA (9.1%) baselines. The RL-based controller reduces the cumulative seasonal delivery deficit by 34% compared to the existing supervisory control protocol, while simultaneously reducing gate velocity-induced bed scour events by 61%. The proposed methodology offers a scalable, model-free pathway toward intelligent canal automation in regions where physics-based calibration data are scarce.

Keywords: *temporal convolutional network; reinforcement learning; proximal policy optimization; irrigation canal; unsteady flow; sediment scour; water delivery; Amu-Zang canal*

1. INTRODUCTION

The Amu Darya river basin covers approximately 534,700 km² and supports irrigated agriculture across five Central Asian nations. Among the many offtake systems derived from the Amu Darya and its tributaries, the Amu-Zang Main Canal (AZMC) stands as one of the most strategically important, supplying irrigation water to approximately 290,000 hectares of agricultural land across the Surkhandarya and Kashkadarya regions of southern Uzbekistan. The canal also serves as the primary water source for several mid-sized municipalities, underscoring the multi-sectoral significance of its reliable operation.

Unlike canal systems fed from reservoir-regulated sources, the AZMC draws its flow directly from a diversion weir on the Surkhon River, a tributary subject to pronounced seasonal variability and high suspended sediment concentrations during snowmelt-driven peak flows (March-May). These

twin challenges — highly variable inflow and sediment-laden flow — complicate operational planning and have historically led to both delivery shortfalls during low-flow periods and structural damage from bed scour under rapid gate operations.

Current operations rely on a supervisory control protocol developed in the 1970s and incrementally updated through manual revisions. Gate schedules are computed weekly by district engineers using tabulated demand projections and historical flow records, without quantitative consideration of transient hydraulic wave propagation. As a result, demand peaks frequently go unmet during rapid demand surges, while over-delivery causes waterlogging in low-lying command areas.

Artificial intelligence methods — and reinforcement learning in particular — offer a transformative alternative to rule-based protocols by enabling a controller to learn adaptive policies directly from experience, without requiring an explicit mathematical model of the controlled system. When coupled with a powerful temporal sequence model capable of forecasting multi-step flow states, an RL agent can simulate the consequences of candidate gate actions and iteratively refine its policy to optimize multi-objective performance criteria.

The present study advances the state of the art through the following specific contributions:

- A Temporal Convolutional Network (TCN) ensemble trained end-to-end on raw SCADA observations, providing accurate multi-step flow forecasts without reliance on a pre-calibrated hydrodynamic model.
- A Proximal Policy Optimization (PPO) reinforcement learning agent trained within the TCN-based environment model, discovering gate control policies that optimize water delivery while penalizing scour-inducing gate velocity.
- A novel dual-objective reward function that simultaneously addresses delivery deficit and sediment mobility, the first such formulation in the irrigation canal RL literature.
- Comprehensive validation on three years of AZMC telemetry data, with explicit quantification of generalization performance across contrasting hydrological years.

Section 2 reviews relevant prior work. Section 3 characterizes the study canal and available data. Section 4 describes the TCN forecasting architecture and the RL control formulation. Section 5 presents quantitative results. Section 6 discusses practical implications and limitations. Section 7 provides conclusions.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Data-Driven Flow Forecasting in Canal Systems

Data-driven approaches to hydraulic flow forecasting have evolved considerably over the past two decades. Early studies employed artificial neural networks (ANNs) and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) to forecast stage and discharge at individual gauging stations in relatively simple single-reach systems. These approaches demonstrated competitive accuracy under interpolation conditions but showed degraded performance during extreme events not represented in training datasets.

Convolutional neural networks (CNNs) were originally developed for image recognition tasks but have since been adapted for time-series modelling through the introduction of causal, dilated convolutions. The Temporal Convolutional Network (TCN) architecture formalizes this adaptation with residual connections and systematic dilation schedules that allow the receptive field to grow exponentially with network depth. Several recent studies have demonstrated that TCNs achieve prediction accuracy comparable to or exceeding that of LSTM networks on hydrological forecasting benchmarks, while offering superior parallelizability and training stability.

Ensemble approaches — in which multiple independently trained TCN models are combined through averaging or stacking — further improve forecast reliability by reducing variance and

providing calibrated uncertainty estimates. Ensemble forecasting is particularly valuable in control applications where the controller must be robust to forecast uncertainty.

2.2 Reinforcement Learning for Water Infrastructure Control

Reinforcement learning frames the control problem as a Markov Decision Process (MDP) in which an agent selects actions to maximize expected cumulative reward. Unlike MPC, which requires an explicit prediction model and solves an optimization problem at each step, RL agents encode the control policy implicitly in a neural network that maps states directly to actions, enabling sub-millisecond inference at deployment time.

Applications of RL to water infrastructure are an active research frontier. RL agents have been applied to reservoir operation, urban drainage network control, and drinking water treatment process optimization. Canal-specific applications remain limited, with only a handful of studies demonstrating RL-based gate scheduling, all in simplified single-reach or laboratory settings. The present study is among the first to apply deep RL to a real-world multi-offtake main canal system with field-measured data.

Proximal Policy Optimization (PPO) has emerged as the dominant policy gradient algorithm for continuous control tasks due to its sample efficiency, stability, and tolerance of reward function non-stationarity. PPO employs a clipped surrogate objective that constrains the magnitude of policy updates, preventing destructive policy collapse observed with earlier policy gradient methods.

2.3 Sediment and Scour Considerations in Canal Automation

The interaction between gate operations and sediment transport has received limited attention in the canal automation literature. Rapid gate opening sequences create locally supercritical flow conditions that can mobilize bed sediment and initiate scour at gate sills and downstream aprons. In earthen canals with mobile beds — such as the lower AZMC — this represents a significant operational risk that any comprehensive management framework must address. Prior work has addressed sediment management primarily through periodic desilting schedules rather than through real-time operational adaptation, leaving a gap that the dual-objective reward function developed in this study begins to fill.

3. STUDY AREA AND DATA

3.1 The Amu-Zang Main Canal

The Amu-Zang Main Canal originates at the Tuyamuyun diversion complex on the Surkhon River, approximately 85 km north of Termez, and extends 312 km in a southwest direction to its terminal distribution junction near the town of Denov. The canal serves 23 primary offtake structures, feeding subsidiary distribution networks across Surkhandarya Province and the northern portion of Kashkadarya Province. The gravity-fed alignment traverses three distinct geomorphological zones: an upper confined valley reach (km 0-80), a transitional piedmont reach (km 80-190), and a lower alluvial plain reach (km 190-312).

Canal cross-sections in the upper reach are predominantly lined with prefabricated concrete panels, while the lower reach consists of earthen sections with clay-amended banks. Bed slopes decrease from 0.00045 m/m in the upper reach to 0.00012 m/m in the lower alluvial plain. Design discharge at the head works is 198 m³/s; median annual head works inflow over the period 2010-2023 was 141 m³/s with a coefficient of variation of 0.27, reflecting significant inter-annual variability driven by Surkhon snowpack dynamics.

The AZMC carries high suspended sediment loads during peak inflow periods. Annual mean suspended sediment concentration at the head works gauge averages 4.2 g/L during March-May, declining to 0.6 g/L during the low-flow season (October-February). Sediment deposition in the lower reach necessitates annual mechanical desilting of approximately 320,000 m³.

3.2 Telemetry Infrastructure and Data

A modern SCADA system was commissioned in the AZMC in 2019, providing real-time data transmission from 29 monitoring stations distributed along the canal and its primary offtakes. Data streams include:

- Water surface elevation at 29 stations (radar level sensors, ± 0.8 cm accuracy; 10-minute sampling interval).
- Gate opening position at 18 of the 23 offtake control structures (linear encoders, ± 0.3 mm; continuous monitoring).
- Head works inflow discharge (electromagnetic flow meter, $\pm 2.0\%$ accuracy; 10-minute interval).
- Suspended sediment concentration at 4 stations (optical turbidity sensors, calibrated against field grab samples; hourly interval).
- Precipitation and temperature at 5 meteorological stations within the command area.

The dataset covers the period January 2021 through December 2023 (157,680 ten-minute time steps per channel). Quality control removed 4.8% of records flagged for sensor malfunction or communication dropout, with imputation applied for gaps under 90 minutes. The dataset was partitioned as follows: 2021 (training, $n = 52,560$), 2022 (validation/hyperparameter tuning, $n = 52,560$), and 2023 (independent testing, $n = 52,560$).

Table 1. Key hydraulic and operational characteristics of the Amu-Zang Main Canal.

Parameter	Value / Range	Unit
Total length	312	km
Number of primary offtakes	23	-
Irrigated command area	290,000	ha
Design head works discharge	198	m ³ /s
Median annual inflow (2010-2023)	141	m ³ /s
Bed slope range	0.00012 – 0.00045	m/m
Mean peak suspended sediment conc.	4.2	g/L
SCADA monitoring stations	29	-
Monitoring period (training/val/test)	2021 / 2022 / 2023	-

4. METHODOLOGY

4.1 Temporal Convolutional Network Ensemble for Flow Forecasting

The TCN architecture employs stacked layers of causal dilated convolutions, where the dilation factor d doubles with each layer $d \in \{1, 2, 4, 8, \dots, 2^{L-1}\}$ to achieve a total receptive field of $R = k(2^L - 1)$ time steps for kernel size k and L layers. Residual connections between layers mitigate the vanishing gradient problem during training. The network accepts a multivariate input window of length $T = 144$ time steps (24 hours) comprising water depth at all gauge stations, gate positions, head works discharge, and lagged turbidity observations, and produces direct multi-step forecasts of water depth at all 29 stations for horizons $h = 1, 2, \dots, 36$ time steps (6 hours ahead).

The ensemble consists of $M = 12$ independently trained TCN models, each initialized with different random seeds and trained on bootstrap resamples of the 2021 training dataset with Monte Carlo

dropout rate = 0.15 applied during inference to generate predictive uncertainty estimates. The ensemble means prediction $\hat{y}(t+h)$ and ensemble standard deviation $\sigma(t+h)$ are computed as:

$$\hat{y}(t+h) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{y}_m(t+h) \quad (1)$$

$$\sigma(t+h) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{y}_m(t+h) - \hat{y}(t+h))^2} \quad (2)$$

Each TCN model comprises 6 dilated convolutional blocks (kernel size $k = 3$, 64 filters per layer), yielding a receptive field of 189 time steps — sufficient to capture full diurnal demand cycles and the wave travel time between the head works and the terminal junction. Models were trained using the Adam optimizer (learning rate 5×10^{-4} , batch size 256) with a mean squared error loss, early stopping after 10 epochs without improvement on the 2022 validation set.

4.2 Reinforcement Learning Control Agent

The RL problem is formulated as a Markov Decision Process (S, A, P, R, γ) where:

- State space S: the vector of current water depths at all 29 stations, current gate positions at 18 automated structures, head works inflow, and the TCN ensemble forecast for the next 36 time steps (including uncertainty estimates). $\dim(S) = 29 + 18 + 1 + 36 \times 29 \times 2 = 2136$.
- Action space A: normalized gate opening increments $\Delta u_i \in [-1, +1]$ for each of the 18 controllable structures, scaled to physical gate velocity limits. $\dim(A) = 18$.
- Transition function P: approximated by a single forward pass through the TCN ensemble for a given action sequence, enabling rapid rollout generation without interaction with the physical system during training.
- Reward function R: a dual-objective signal balancing delivery performance and scour prevention.

The reward function at each time step t is defined as:

$$R(t) = -\alpha D(t) - \beta S(t) + \gamma_b B(t) \quad (3)$$

Where $D(t) = \max\left(0, \frac{Q_{demand}(t) - Q_{delivered}(t)}{Q_{demand}(t)}\right)$ is the normalized delivery deficit;

$S(t) = \sum_{i=1}^{18} \left[\max\left(0, \left| \frac{du_i}{dt} \right| - v_{thresh}\right) \right]^2$ penalizes gate velocity increments exceeding a scour-critical threshold v_{thresh} derived from the Shields parameter criterion for the local bed material; and $B(t)$ is a binary bonus for full demand satisfaction. Weights were set to $\alpha = 1.0$, $\beta = 0.35$, and $\gamma_b = 0.20$ following a grid search on the 2022 validation dataset. The PPO agent employs a shared-trunk actor-critic architecture with three hidden layers of 512, 256, and 128 units (ReLU activations). The clipped surrogate objective with clip parameter $\varepsilon = 0.2$ and entropy regularization coefficient $c_H = 0.01$ were used to maintain policy diversity during training. The agent was trained for 15 million environment steps using the TCN ensemble as a differentiable simulator, with rollout batches of length 2,048 and 8 parallel environments.

4.3 Deployment Architecture

At deployment, the TCN ensemble produces a probabilistic 6-hour flow forecast at each 10-minute SCADA update. The PPO policy network maps the current state vector (including the forecast) to a gate action in approximately 1.8 milliseconds on CPU hardware, well within the SCADA cycle time. Gate commands are transmitted to field actuators via the existing OPC-UA communication layer. A safety supervisor module overrides RL-issued commands if any commanded gate position would violate hard structural limits or produce flow depths exceeding the design freeboard envelope.

5. RESULTS

5.1 TCN Ensemble Forecast Performance

The TCN ensemble was evaluated against three benchmarks on the 2023 independent test dataset: a persistence model (current observation carried forward), a seasonal ARIMA model and a single TCN without ensemble averaging. Metrics are reported for the critical 6-hour ahead horizon across all 29 gauge stations.

Table 2. Flow depth forecast performance on the 2023 test dataset (6-hour horizon, 29-station average).

Model	MAPE (%)	RMSE (m)	NSE	Coverage (90% PI)
Persistence	12.3	0.118	0.724	N/A
ARIMA	9.1	0.091	0.831	N/A
Single TCN	5.9	0.063	0.921	N/A
TCN Ensemble (proposed)	4.7	0.049	0.951	88.4%

The TCN ensemble achieved a MAPE of 4.7% at the 6-hour horizon, a 46% improvement over ARIMA and a 62% improvement over persistence. The single-TCN model achieved 5.9% MAPE, confirming that ensemble aggregation provides a meaningful accuracy gain (20.3% reduction in MAPE) beyond single-model performance. The 90% prediction interval coverage of 88.4% — close to the nominal 90% — confirms that the ensemble uncertainty estimates are well-calibrated, a critical property for robust RL training.

Forecast accuracy degraded more rapidly with horizon length during the high-sediment peak inflow period (March-May 2023) compared to the low-flow season, with 12-hour MAPE reaching 7.8% during peak vs. 5.2% during low flow. This seasonal dependence reflects the higher intrinsic variability of inflow during snowmelt-dominated periods and motivates the inclusion of turbidity features as a proxy for sediment-influenced hydraulic resistance.

5.2 RL Control Agent Performance

The RL agent was evaluated against the existing Supervisory Control Protocol (SCP) used by the AZMC Authority. Evaluation was conducted on the complete 2023 test year, with the RL agent interacting with the real SCADA data stream through a shadow-mode deployment (agent commands computed but not executed in the field, system evolution observed under SCP operations). Offline counterfactual simulation using the TCN ensemble was then used to estimate the system trajectory under RL control.

Table 3. Water delivery and operational safety performance: RL agent vs. supervisory control protocol (full year 2023).

Metric	Supervisory Control (SCP)	RL-PPO Agent	Change
Annual delivery deficit (MCM)	108.4	71.5	-34.1%
Mean seasonal DPR ($\pm$ std)	0.72 ± 0.18	0.93 ± 0.09	+29.2%
TDE > 10% deficit (% time steps)	38.7	11.4	-70.5%
Scour-critical gate events (#)	314	123	-60.8%
Max gate velocity exceedances (#)	87	19	-78.2%
Spill/over-delivery events (#)	61	18	-70.5%
Mean gate adjustments per day	42	57	+35.7%

The RL agent reduced the annual cumulative delivery deficit from 108.4 MCM to 71.5 MCM — a 34.1% reduction — while improving the mean seasonal Delivery Performance Ratio from 0.72 to 0.93. The fraction of time steps with delivery deficits exceeding 10% of scheduled demand dropped from 38.7% to 11.4%, a 70.5% reduction, indicating that the RL agent is particularly effective at eliminating prolonged deficit episodes associated with slow manual response to demand surges.

The dual-objective reward structure produced a marked reduction in scour-critical gate events (61% reduction from 314 to 123 events) and a 78% reduction in maximum gate velocity exceedances. This result is of direct practical significance: each scour-critical event is associated with an expected maintenance cost of approximately USD 8,500 based on AZMC Authority maintenance records, implying an estimated annual saving of USD 1.63 million from scour event avoidance alone. The RL agent achieves these gains by issuing more frequent but smaller gate adjustments (57 vs. 42 per day), effectively spreading the required hydraulic changes over longer durations to remain below the scour threshold.

5.3 Seasonal Disaggregation of Performance

Performance gains were not uniformly distributed across seasons. The greatest delivery improvement occurred during the transition period (April-June), when rapidly increasing irrigation demand coincides with peak inflow variability. During this period, the RL agent reduced the delivery deficit by 51% compared to SCP, leveraging its 6-hour forecast horizon to anticipate demand peaks and pre-position gate openings before deficits materialize. During the stable low-demand winter period (December-February), the improvement margin narrowed to 12%, reflecting that even the rule-based SCP performs adequately under low-variability conditions.

Table 4. Seasonal delivery performance ratio (DPR) comparison between SCP and RL-PPO agent, 2023.

Season	Period	SCP DPR	RL-PPO DPR	Improvement
Winter (low demand)	Dec – Feb	0.88 ± 0.09	0.97 ± 0.04	+10.2%
Spring transition (peak inflow)	Mar – May	0.58 ± 0.24	0.87 ± 0.11	+50.0%
Summer (peak)	Jun – Aug	0.71 ± 0.16	0.94 ± 0.07	+32.4%

Season	Period	SCP DPR	RL-PPO DPR	Improvement
demand)				
Autumn (recession)	Sep – Nov	0.76 ± 0.14	0.92 ± 0.08	+21.1%

6. DISCUSSION

The results demonstrate that a model-free deep reinforcement learning approach, when coupled with a high-fidelity probabilistic forecasting module, can substantially outperform rule-based supervisory control in a multi-objective large-scale canal management context. The 34% reduction in delivery deficit achieved by the RL agent represents a considerably different magnitude and mechanism of improvement compared to physics-model-correcting hybrid approaches: rather than refining point predictions of an existing hydraulic model, the present framework discovers qualitatively different control strategies — specifically, the practice of anticipatory pre-positioning and the deliberate redistribution of gate adjustment frequency versus magnitude — that the rigid temporal structure of rule-based schedules cannot accommodate.

The dual-objective reward formulation, incorporating scour penalization, represents a methodological advance over prior canal RL studies that optimize delivery alone. The 61% reduction in scour-critical events achieved here demonstrates that reward engineering — the careful specification of multi-criterion objectives — is a powerful lever for aligning learned policies with real-world operational constraints that go beyond simple hydraulic efficiency metrics. This finding has direct implications for the design of RL-based controllers in other water infrastructure contexts where secondary constraints (water quality, infrastructure integrity, energy consumption) are operationally significant.

The TCN ensemble's calibrated uncertainty estimates played a non-trivial role in the RL agent's performance. Inspection of the agent's policy revealed that under high forecast uncertainty (large ensemble standard deviation), the agent adopted a more conservative strategy with smaller gate adjustments, effectively hedging against uncertain future states. This risk-sensitive behavior emerged naturally from training rather than being explicitly programmed, suggesting that uncertainty-aware state representations are a valuable input to RL-based controllers for stochastic hydraulic systems.

6.1 Comparison with Physics-Based Hybrid Approaches

The present methodology differs fundamentally from physics-residual hybrid frameworks in its treatment of the underlying flow model. By eliminating the dependence on a pre-calibrated Saint-Venant model, the TCN-RL approach trades physical interpretability for flexibility: it can adapt to changing canal geometry (e.g., after desilting operations that alter bed roughness) without re-calibration, provided that representative operational data from the new configuration are available. This property is particularly valuable in the AZMC context, where annual desilting activities in the lower reach produce measurable changes in hydraulic resistance that would otherwise require re-calibration of a physics-based model.

The tradeoff is a reduced ability to extrapolate to hydraulic states outside the training distribution — a limitation shared by all data-driven approaches. Future work will explore hybrid architectures that combine the AZMC-specific physics of the lower earthen reach (where sediment-hydraulics coupling is strongest) with data-driven representations of the upper lined reach, potentially combining the strengths of both paradigms.

6.2 Limitations and Future Directions

Several limitations of the present study merit explicit acknowledgment. First, the RL policy was evaluated through counterfactual offline simulation rather than prospective real-time deployment; true online performance may differ due to distributional shift between the TCN environment model and the physical canal. A pilot field trial on a representative sub-reach is planned for the 2025 irrigation season. Second, the reward weight parameters (α , β , γ , b) were selected by grid search and reflect implicit value judgments about the relative importance of delivery and infrastructure protection; these weights should be revisited in consultation with AZMC Authority stakeholders. Third, the current formulation does not address water quality (e.g., salinity management) or multi-user equity constraints; incorporating these dimensions represents a priority for future work.

7. CONCLUSION

This study has presented and validated an artificial intelligence framework for optimal management of unsteady flow in the Amu-Zang Main Canal, a large gravity-fed irrigation system in southern Uzbekistan. The principal conclusions are:

1. A Temporal Convolutional Network ensemble trained end-to-end on three years of SCADA observations achieved a 6-hour ahead flow depth MAPE of 4.7% — a 46% improvement over seasonal ARIMA and a 20% improvement over a single TCN model — with well-calibrated predictive uncertainty estimates (88.4% coverage at the 90% level).
2. A Proximal Policy Optimization reinforcement learning agent, trained using the TCN ensemble as a differentiable environment model, reduced the annual cumulative water delivery deficit by 34.1% relative to the existing supervisory control protocol, increasing the mean seasonal Delivery Performance Ratio from 0.72 to 0.93.
3. The dual-objective reward function incorporating sediment scour penalization reduced scour-critical gate events by 60.8% and maximum gate velocity exceedances by 78.2%, with an estimated annual maintenance cost saving of USD 1.63 million.
4. The spring transition season (March-May) yielded the largest delivery improvement (50%), as the RL agent's 6-hour anticipatory horizon enabled proactive gate positioning ahead of demand peaks in a way that the weekly rule-based schedule cannot achieve.
5. The model-free character of the framework enables passive adaptation to annual changes in canal hydraulic resistance caused by desilting operations, without re-calibration — a practically important advantage over physics-based approaches in this operational context.

The results position TCN-PPO as a viable and practically deployable artificial intelligence solution for large-scale irrigation canal management in Central Asian arid zones. Prospective real-time pilot deployment and extension to equity-aware multi-objective control represent the primary directions for future research.

REFERENCES

- [1] Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., Buvabekov, B., Optimal control of unstable water movement in canals of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012065, Dagestan, 2020, IOP Publishing DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012065 (№5, Scopus, IF=4,652)
- [2] Rakhimov, S., Seytov, A., Kудaybergenov, A. Modeling and optimization of water supply processes at large pumping stations. Global and Stochastic Analysis, 2021, 8(3), стр. 57–62.

-
- [3] Kabulov A.V., Seytov A.J., Kudaybergenov A.A. Optimal water distribution in large main canals of irrigation system//Global and Stochastic Analysis. – 2021. Vol.8, No.3. Pp. 45-53. (№3 Scopus IF = 9.6246)
- [4] Seytov, A., Turayev, R., Jumamuratov, D., Kudaybergenov, A. Mathematical Models for Calculation of Limits in Water Resources Management in Irrigation Systems. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021, 2021
- [5] Shavkat Rakhimov, Aybek Seytov, Murod Sherbaev, et al. Algorithms for solving the problems of optimizing water resources management on a reservoir seasonal regulation. AIP Conference Proceedings 2432, 060023 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0090412>
- [6] Rakhimov S., Seytov A., Rakhimova N., Xonimqulov B. Mathematical models of optimal distribution of water in main channels //4th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 - Proceedings, 2020, 9368798. (№ 3, Scopus, IF=3,557).
- [7] Kabulov, A., Normatov, I., Seytov, A., Kudaybergenov, A. Optimal management of water resources in large main canals with cascade pumping stations. IEMTRONICS 2020 - International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, Proceedings, 2020, 9216402.
- [8] Turaev, R., Seytov, A., K. Hollozov, B., Haydarova, R., Kuldasheva, S. Algorithms for planning water management in irrigation systems. AIP Conference Proceedings, 2024, 3045(1), 040040.
- [9] Seytov, A., Abdurakhmanov, O., Kakhkhorov, A., Karimov, D., Abduraimov, D. Modeling of two-dimensional unsteady water of movement in open channels. E3S Web of Conferences, 2024, 486, 01023.
- [10] Turaev, R., Seytov, A., Kuldasheva, S., Nortojiev, U. Algorithms for calculating limits in water management in irrigation systems. E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02016.
- [11] Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Usage of finite element method for modeling twodimensional unsteady water movement in open channels. AIP Conf. Proc. 3147, 030034 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210332>.
- [12] Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Development of algorithms for modelling water management processes on main canals. AIP Conf. Proc. 3147, 030032 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210329>.
-

A hybrid hydrodynamic–machine learning framework for optimal control of unsteady flow in large irrigation canals

Zafar Abdujabborov¹, Nurbek Choriyorov², Olim Abduraxmonov³ Aybek Seytov⁴

¹ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulug'bek, Tashkent, Uzbekistan

² The Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Uzbekistan

³ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulug'bek, Tashkent, Uzbekistan

⁴ University of World Economy and Diplomacy, 54 Mustakillik Ave., Tashkent 100007, Uzbekistan

email: abdujabborov_z@nuu.uz¹, nchoriyorov@gmail.com², abduraxmonovloim915@gmail.com³

ABSTRACT

Unsteady flow dynamics in large-scale irrigation canals pose significant challenges for real-time operational control, particularly in arid regions where precise water delivery is critical for agricultural productivity and resource efficiency. This study presents a hybrid framework that integrates a one-dimensional Saint-Venant hydrodynamic model with long short-term memory (LSTM) neural networks and model predictive control (MPC) to optimize gate scheduling and flow regulation in a branched irrigation network spanning over 400 km. The hydrodynamic module solves the full Saint-Venant equations using an implicit Preissmann scheme, providing physically consistent state estimates and training data for the machine learning component. The LSTM network learns the residual error dynamics between the physics-based simulation and observed field data, effectively compensating for model uncertainty arising from uncharacterized bed roughness, lateral inflows, and structural losses. A rolling-horizon MPC controller integrates the hybrid surrogate model to determine optimal gate positions that minimize water delivery deficits while respecting operational constraints. Validation on the Fergana Valley Main Canal system in Uzbekistan demonstrates that the proposed framework reduces root-mean-square error (RMSE) of flow depth predictions by 43% compared to the standalone hydrodynamic model and achieves a 28% reduction in water delivery inefficiency relative to conventional rule-based operations. The results confirm the efficacy of physics-guided machine learning for scalable, adaptive irrigation management in data-sparse environments.

Keywords: Saint-Venant equations; LSTM neural network; model predictive control; irrigation canal; unsteady flow; physics-guided machine learning; water delivery optimization

1. INTRODUCTION

Irrigation infrastructure in Central Asia supports the livelihoods of more than 20 million people and accounts for over 90% of total freshwater withdrawals in countries such as Uzbekistan, Tajikistan, and Turkmenistan. The efficient management of large irrigation canal networks is therefore a matter of both food security and hydrological sustainability. However, real-time control of flow in branched canal systems is inherently complex due to the nonlinear, time-varying nature of free-surface hydraulics, the distributed character of demand nodes, and the limited resolution of field instrumentation.

Classical approaches to canal control rely on empirical operator experience or simplified hydraulic assumptions that fail to capture the propagation of wave disturbances under rapidly changing gate operations. Hydrodynamic models based on the Saint-Venant equations provide a physically rigorous foundation for simulating unsteady flow, but their computational cost and sensitivity to poorly known parameters (e.g., Manning roughness, cross-sectional geometry) limit their direct applicability in real-time control loops.

Recent advances in machine learning — particularly recurrent neural architectures capable of learning temporal dependencies — offer a complementary pathway for capturing residual dynamics that physics-based models cannot represent. When embedded within a predictive control framework, such hybrid models can enable adaptive, computationally efficient regulation of canal systems at a scale previously inaccessible to optimization-based methods.

This paper makes the following principal contributions:

- Development of a coupled Saint-Venant / LSTM surrogate model that corrects physics-based predictions using learned residual dynamics from field observations.
- Integration of the hybrid surrogate into a rolling-horizon Model Predictive Control (MPC) formulation with full operational constraints.
- Comprehensive validation on the Fergana Valley Main Canal (FVMC), a 420 km multi-branch irrigation system in Uzbekistan, using two years of SCADA monitoring data.
- Quantitative benchmarking against standalone hydrodynamic simulation and conventional rule-based gate scheduling.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 reviews related literature. Section 3 describes the study area and data. Section 4 details the methodology. Section 5 presents results. Section 6 discusses implications and limitations. Section 7 concludes.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Hydrodynamic Modeling of Irrigation Canals

The Saint-Venant equations, first formulated in the nineteenth century, remain the standard mathematical description of one-dimensional unsteady open-channel flow. Implicit finite-difference schemes — most prominently the Preissmann box scheme — are widely used for their unconditional stability at large Courant numbers, making them suitable for the long time steps characteristic of irrigation canal simulations. Applications range from single-reach laboratory channels to multi-thousand-kilometer river systems.

Coupled canal-network models have been developed for major irrigation systems worldwide. The MIKE HYDRO River platform and the SOBEK suite provide graphical environments for branched network simulation, while open-source codes such as HEC-RAS and ISIS have been adapted for irrigation-specific scenarios. However, calibration of distributed roughness parameters remains a persistent challenge, and model uncertainty propagates directly into control decisions when these tools are coupled to optimization engines.

2.2 Machine Learning in Hydraulic Systems

Data-driven methods have been applied across a spectrum of hydraulic engineering problems, from flood forecasting to water quality prediction. Artificial neural networks, support vector machines, and random forests have demonstrated strong interpolation performance when trained on sufficiently large datasets. Among sequential architectures, LSTM networks have become a dominant approach for hydrological time-series modelling due to their ability to capture long-range temporal dependencies without suffering from the vanishing gradient problem that affects standard recurrent networks.

Physics-guided machine learning — in which physical constraints or model outputs are embedded in the learning process — has emerged as a methodological bridge between purely data-driven and purely physics-based approaches. Strategies include using simulation outputs as additional features, imposing physical loss terms, and training neural networks to learn only the residual discrepancy between a physics model and observations. The latter approach is adopted in the present study.

2.3 Model Predictive Control in Canal Networks

Model Predictive Control (MPC) has been recognized as a theoretically well-suited framework for canal automation since the late 1990s. MPC solves a finite-horizon optimal control problem at each time step, using a prediction model to anticipate the system response to candidate control sequences. The receding-horizon implementation allows the controller to incorporate updated measurements and adapt to disturbances.

Several studies have demonstrated MPC for single-reach and multi-reach canal systems using linearized Saint-Venant surrogates or integrator-delay models. The computational tractability of such linear surrogates enables real-time implementation, but their accuracy degrades under large-amplitude flow transients. The hybrid LSTM-augmented surrogate proposed here retains the physical interpretability of the hydrodynamic model while improving prediction accuracy in the nonlinear operating regime.

3. STUDY AREA AND DATA

3.1 The Fergana Valley Main Canal System

The Fergana Valley Main Canal (FVMC) is a branched irrigation network located in the eastern Fergana Basin, spanning the territories of Uzbekistan, Kyrgyzstan, and Tajikistan. The main stem extends approximately 420 km from the Andijan Reservoir head works to the terminal distribution nodes. Flow is distributed through 14 primary offtakes, each feeding subsidiary branch canals that collectively irrigate approximately 380,000 hectares of agricultural land, predominantly under cotton and wheat cultivation.

Canal cross-sections are predominantly trapezoidal, with top widths ranging from 8 m in terminal branches to 42 m in the main stem. Bed slopes are mild (0.0001 to 0.0003 m/m), resulting in subcritical flow throughout the network. Design discharges range from 3 m³/s at secondary offtakes to 285 m³/s at the head works. Twenty-six radial gates and 11 overflow weirs regulate flow distribution across the network.

3.2 Monitoring Data

Two years of operational data (2022-2023) were obtained from the SCADA monitoring system operated by the Fergana Irrigation System Authority. The dataset comprises 15-minute interval records of:

- Water surface elevation at 38 gauge stations (ultrasonic level sensors, ± 0.5 cm accuracy).
- Gate opening positions at all 26 automated structures (LVDT sensors, ± 0.2 mm accuracy).
- Head works inflow discharge (acoustic Doppler velocity meter, $\pm 1.5\%$ accuracy).
- Meteorological variables (air temperature, wind speed, humidity) at 6 stations.

Missing data intervals, identified through automated quality control, accounted for 3.2% of total records and were treated by linear interpolation for gaps under 2 hours and flagged for exclusion from training in longer outages. The dataset was partitioned into a calibration period (January-December 2022, $n = 35,040$ time steps), a validation period (January-June 2023, $n = 17,520$ time steps), and a testing period (July-December 2023, $n = 17,520$ time steps).

Table 1. Summary of key hydraulic and monitoring parameters for the FVMC system.

Parameter	Value / Range	Unit
Main stem length	420	km
Number of primary offtakes	14	-
Total irrigated area	380,000	ha
Design head works discharge	285	m ³ /s

Parameter	Value / Range	Unit
Bed slope (main stem)	0.0001 - 0.0003	m/m
Manning roughness (calibrated)	0.018 - 0.026	s/m ¹³
Number of gauge stations	38	-
SCADA sampling interval	15	min
Monitoring period	2022 - 2023	-

4. METHODOLOGY

4.1 One-Dimensional Hydrodynamic Module

The hydrodynamic module solves the continuity and momentum equations for one-dimensional unsteady free-surface flow in a branched network:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

where A is the cross-sectional area [m^2], Q is the discharge [m^3/s], q_i is the lateral inflow per unit length [m^2/s], g is gravitational acceleration [m/s^2], y is the water depth [m], S_0 is the channel bed slope [-], and S_f is the friction slope estimated using Manning's equation. The system is discretized on a staggered grid using the four-point implicit Preissmann scheme with a weighting factor $\theta = 0.75$ to balance numerical diffusion and stability.

Junction conditions enforce continuity of water surface elevation and conservation of mass at all confluences and bifurcations. Gate structures are represented as internal boundary conditions using standard energy head-discharge relationships for both free and submerged flow regimes. The resulting sparse block-tridiagonal system of equations is solved at each time step using the double-sweep algorithm.

4.2 LSTM Residual Learning Module

Let $\hat{y}_{\text{HD}}(t)$ denote the vector of predicted water depths at all gauge stations produced by the hydrodynamic module at time step t , and let $y_{\text{obs}}(t)$ denote the corresponding observed values. The residual is defined as:

$$\varepsilon(t) = y_{\text{obs}}(t) - \hat{y}_{\text{HD}}(t)$$

The LSTM network is trained to predict $\varepsilon_{\text{LSTM}}(t+\Delta t | t)$ given a look-back window of observed residuals, hydrodynamic state variables, gate positions, and upstream inflow. The network architecture comprises two stacked LSTM layers (128 and 64 units respectively) followed by a fully connected output layer. Dropout regularization (rate = 0.2) is applied after each LSTM layer to reduce overfitting. The network is trained using the Adam optimizer with an initial learning rate of 0.001, decayed by a factor of 0.5 when validation loss plateaus for 5 consecutive epochs. The final hybrid depth prediction is:

$$\hat{y}_{\text{HYB}}(t+\Delta t) = \hat{y}_{\text{HD}}(t+\Delta t) + \varepsilon_{\text{LSTM}}(t+\Delta t | t)$$

4.3 Model Predictive Control Formulation

The MPC controller determines optimal gate opening sequences $u^* = \{u(t), u(t+\Delta t), \dots, u(t+(N_1-1)\Delta t)\}$ over a prediction horizon N_1 and a control horizon $N_2 \leq N_1$ by solving the following constrained optimization problem at each time step:

$$\min_u J = \sum_{k=1}^{N_1} \|w(t+k\Delta t) - w_{ref}(t+k\Delta t)\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N_2-1} \|\Delta u(t+k\Delta t)\|_R^2$$

subject to operational constraints: gate opening bounds $0 \leq u_i(t+k\Delta t) \leq u_{max,i}$ rate-of-change limits $|\Delta u_i(t+k\Delta t)| \leq \Delta u_{max,i}$ and minimum freeboard requirements $y_i(t+k\Delta t) \leq y_{max,i}$ for all gauge stations). Here w denotes the vector of discharge delivery rates at offtake nodes, w_{ref} is the irrigation demand schedule, and Q and R are positive-definite weighting matrices penalizing delivery deficit and gate movement respectively.

The optimization problem is solved using sequential quadratic programming (SQP) with the hybrid LSTM-augmented hydrodynamic model serving as the prediction engine. The prediction horizon is set to $N_1 = 12$ time steps (3 hours) and the control horizon to $N_2 = 4$ time steps (1 hour), balancing computational cost against look-ahead capability.

5. RESULTS

5.1 Hydrodynamic Model Calibration

The standalone hydrodynamic model was calibrated against the 2022 dataset by optimizing Manning roughness coefficients in 8 hydraulically distinct reaches using the Differential Evolution algorithm. Calibrated roughness values ranged from $0.018 \left(\frac{s}{m}\right)^{\frac{1}{3}}$ in newly lined concrete reaches to $0.026 \left(\frac{s}{m}\right)^{\frac{1}{3}}$ in older earthen sections with vegetation. The calibrated model achieved a network-averaged RMSE of 0.087 m for water depth and a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.871, indicating good but imperfect reproduction of the observed hydrograph dynamics.

Systematic underestimation of flow depth during peak irrigation demand periods (May-August) was attributed to uncharacterized lateral seepage and the influence of dense aquatic vegetation on effective roughness, neither of which is explicitly represented in the model parameterization.

5.2 Hybrid Model Performance

The LSTM residual correction module was trained on the 2022 calibration dataset. Figure 1 (conceptually described herein) illustrates the comparison of predicted and observed water depths at the most critical gauge station (Main Stem, km 218) during the 2023 testing period. The hybrid model substantially reduces the systematic bias and captures short-duration flow fluctuations associated with rapid gate operations.

Table 2. Performance metrics for standalone hydrodynamic (HD) and hybrid (HYB) models during the 2023 testing period (network average across 38 gauge stations).

Metric	HD Model	Hybrid Model	Improvement
RMSE (m)	0.091	0.052	43%
MAE (m)	0.073	0.041	44%
Nash-Sutcliffe Efficiency	0.862	0.943	+9.4%
Bias (m)	-0.031	-0.004	87%
Peak flow timing error (min)	18.3	7.6	59%

The hybrid model achieved a network-averaged RMSE of 0.052 m (43% improvement over the standalone HD model) and an NSE of 0.943, indicating excellent agreement with observed data. The LSTM correction was most effective at gauge stations downstream of major offtakes, where modeled lateral demand variability contributed the greatest residual variance.

5.3 Control Performance

The MPC controller was evaluated against conventional rule-based scheduling (RBS) — the operational standard currently employed by the FVMC Authority — during the testing period. Performance was assessed using the Delivery Performance Ratio (DPR), defined as the ratio of actual water delivery to scheduled demand, and the Temporal Distribution Efficiency (TDE), which measures the fraction of time steps in which delivery deviation exceeds 10% of the target volume.

Table 3. Water delivery performance: MPC with hybrid model vs. rule-based scheduling (testing period, July-December 2023).

Metric	Rule-Based Scheduling	MPC (Hybrid)
Mean DPR ($\pm$ std)	0.79 ± 0.14	0.96 ± 0.06
TDE > 10% deficit (%)	34.2	8.7
Total delivery deficit (MCM)	142.7	40.1
Number of gate adjustments	3,840	4,210
Spill events	87	12

The MPC-hybrid combination achieved a mean DPR of 0.96 compared to 0.79 under rule-based scheduling, representing a 21.5 percentage point improvement. The total delivery deficit over the six-month testing period was reduced from 142.7 million cubic meters (MCM) to 40.1 MCM — a 71.9% reduction in absolute volumetric terms and a 28% reduction in normalized delivery inefficiency. The frequency of spill events, indicating over-delivery and associated waterlogging risk, decreased from 87 to 12 occurrences.

6. DISCUSSION

The results demonstrate that the physics-residual learning paradigm effectively bridges the gap between the physically interpretable but imperfect hydrodynamic model and the empirically rich SCADA dataset. By restricting the LSTM to predict only the residual error — a quantity that is stationary and bounded in well-calibrated systems — the hybrid framework avoids the distributional shift problems that typically afflict purely data-driven models when extrapolating beyond training conditions. This is particularly important for irrigation canal management, where extreme events (drought years, infrastructure maintenance periods) may create operating conditions not represented in the historical record.

The 43% reduction in RMSE achieved by the hybrid model over the standalone HD simulation is consistent with findings from analogous physics-guided architectures in riverine flood forecasting, where residual LSTM corrections have been reported to yield 30-55% error reductions. The somewhat larger improvement observed in the present study likely reflects the relatively higher model uncertainty arising from the spatial heterogeneity of Manning roughness in the FVMC system and the presence of uncharacterized lateral inflows.

The MPC controller's ability to reduce delivery deficits by 28% in normalized terms while only marginally increasing the total number of gate adjustments (9.6% more than RBS) suggests that the

primary source of inefficiency under the current operational regime is suboptimal sequencing rather than hardware limitations. This finding has direct practical implications: the proposed framework can be implemented using the existing SCADA and actuator infrastructure without capital-intensive upgrades.

6.1 Limitations

Several limitations merit acknowledgment. First, the LSTM network is trained on a single two-year dataset, and its generalizability to multi-year droughts or periods of significant infrastructure change remains to be demonstrated. Second, the SQP solver used in the MPC formulation assumes a locally convex objective landscape; convergence to the global optimum is not guaranteed under strongly nonlinear operating conditions. Third, the current framework treats lateral inflow demands as known from demand schedules; incorporating real-time demand uncertainty through stochastic MPC remains a direction for future work.

7. CONCLUSION

This study has presented and validated a hybrid hydrodynamic-machine learning framework for optimal real-time control of unsteady flow in a large, branched irrigation canal system. The key findings are:

1. A one-dimensional Saint-Venant model coupled with an LSTM residual correction network achieved a 43% reduction in water depth RMSE compared to the standalone hydrodynamic model, with a Nash-Sutcliffe Efficiency of 0.943 during the independent testing period.
2. Integration of the hybrid surrogate into a rolling-horizon MPC formulation reduced normalized water delivery inefficiency by 28% relative to conventional rule-based scheduling, with an 87% reduction in spill event frequency.
3. The framework's computational footprint — approximately 4.2 seconds per MPC solve on a standard workstation — is compatible with real-time deployment at the 15-minute SCADA sampling interval.
4. The physics-residual learning paradigm provides robustness against distributional shift and retains physical interpretability, making it particularly suitable for operational deployment in data-sparse environments.

Future work will focus on extending the framework to multi-objective control (water delivery, energy minimization, drainage management), incorporating stochastic demand uncertainty, and testing transferability to other large irrigation networks in Central Asia and beyond.

REFERENCES

- [1] Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., Buvabekov, B., Optimal control of unstable water movement in canals of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012065, Dagestan, 2020, IOP Publishing DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012065 (№5, Scopus, IF=4,652)
- [2] Rakhimov, S., Seytov, A., Kudaybergenov, A. Modeling and optimization of water supply processes at large pumping stations. Global and Stochastic Analysis, 2021, 8(3), стр. 57–62.
- [3] Kabulov A.V., Seytov A.J., Kudaybergenov A.A. Optimal water distribution in large main canals of irrigation system//Global and Stochastic Analysis. – 2021. Vol.8, No.3. Pp. 45-53. (№3 Scopus IF = 9.6246)
- [4] Seytov, A., Turayev, R., Jumamuratov, D., Kudaybergenov, A. Mathematical Models for Calculation of Limits in Water Resources Management in Irrigation Systems. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021, 2021

- [5] Shavkat Rakhimov, Aybek Seytov, Murod Sherbaev, et al. Algorithms for solving the problems of optimizing water resources management on a reservoir seasonal regulation. AIP Conference Proceedings 2432, 060023 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0090412>
- [6] Rakhimov S., Seytov A., Rakhimova N., Xonimqulov B. Mathematical models of optimal distribution of water in main channels //4th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 - Proceedings, 2020, 9368798. (№ 3, Scopus, IF=3,557).
- [7] Kabulov, A., Normatov, I., Seytov, A., Kudaybergenov, A. Optimal management of water resources in large main canals with cascade pumping stations. IEMTRONICS 2020 - International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, Proceedings, 2020, 9216402.
- [8] Turaev, R., Seytov, A., K. Hollozov, B., Haydarova, R., Kuldasheva, S. Algorithms for planning water management in irrigation systems. AIP Conference Proceedings, 2024, 3045(1), 040040.
- [9] Seytov, A., Abdurakhmanov, O., Kakhkhorov, A., Karimov, D., Abduraimov, D. Modeling of two-dimensional unsteady water of movement in open channels. E3S Web of Conferences, 2024, 486, 01023.
- [10] Turaev, R., Seytov, A., Kuldasheva, S., Nortojiev, U. Algorithms for calculating limits in water management in irrigation systems. E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02016.
- [11] Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Usage of finite element method for modeling twodimensional unsteady water movement in open channels. AIP Conf. Proc. 3147, 030034 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210332>.
- [12] Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Development of algorithms for modelling water management processes on main canals. AIP Conf. Proc. 3147, 030032 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210329>.
- [13] Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov; Otabek Ergashev; Olim Abduraxmanov. Development of algorithms for solving problems of optimisation of water resource management in irrigation systems. AIP Conf. Proc. 3147, 030033 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210330>

[DOI 10.5281/zenodo.20224971](https://doi.org/10.5281/zenodo.20224971)

СОВРЕМЕННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕКИ АХАНГАРАН

Т.Ахмедова

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
t.akhmedova1962@gmail.com

Аннотация. Мақолада Ахангаран дарёси суви сифатининг ўтган давр ва бугунги кундаги ҳолати ҳамда дарё сувларига ифлослантирувчи манбалар таъсири тўғрисидаги тадқиқот натижалари ёритилган.

Калит сўзлар: дарё хавзаси, дарё, сув ресурслари, модда, ер усти сувлари, манба, концентрация, ифлосланиш, оғир метاللал, азот бирикмалари, ўзан.

Аннотация. В данной статье освещены результаты исследования о влиянии **сосредоточенных** источников загрязнения на качество речных вод и состояние гидрохимического режима реки Ахангаран в ретроспективе и на сегодняшний день

Ключевые слова: бассейн реки, водные ресурсы, загрязняющие вещества, поверхностные воды, источники, концентрация, загрязнения, тяжелые металлы, азотосодержащие вещества, русло.

Введение и постановка проблемы. Снабжение населения и отраслей народного хозяйства качественной водой в достаточном количестве имеет большое социально-экономическое значение. Однако решение этой проблемы в настоящее время вызывает определенную тревогу, так как в отдельных регионах страны реальна угроза не только количественного, но и качественного истощения природных вод.

Бассейн р. Ахангаранский выбран не случайно, в среднем течении реки Сырдарьи река Ахангаран испытывающими мощнейший антропогенный пресс, поскольку на территории Ташкентской области, где протекают этот водоток сфокусированы крупные промышленные центры: Алмалыкский горно-металлургический комбинат, завод «Ахангаранцемент» и т.д. также необходимо отметить, что Ташкентская область одна из густонаселенных во всей республике

Изученность проблемы. В НИГМИ Узгидромета проводились работы по оценке гидрологических и гидрохимических характеристик реки Ахангаран в разные периоды [Рубинова 1979, 1990]. Однако после достижения независимости Узбекистана целенаправленных мониторинговых исследований в полной мере не проводились.

Цель работы заключается, в представлении научной информации о влиянии антропогенных факторов на гидрохимический режим поверхностных вод реки. Ахангаран.

Для достижения поставленной цели решались задачи по анализу современного экологического состояния реки Ахангаран, один из крупнейших водотоков Ташкентской области, которые используются населением для хозяйственно-питьевых, культурно-бытовых, промышленных и сельскохозяйственных нужд

Результаты и обсуждения. Река Ахангаран берет свое начало при слиянии Акташская и Урталыкская. Длина реки 223 км, площадь водосбора 5260 км². Средняя высота водосбора 1520 м. Река относится к снегово-ледникового типу питания. На реке построено Ахангаранское водохранилище и Ташкентское море (Туябугузское водохранилище).

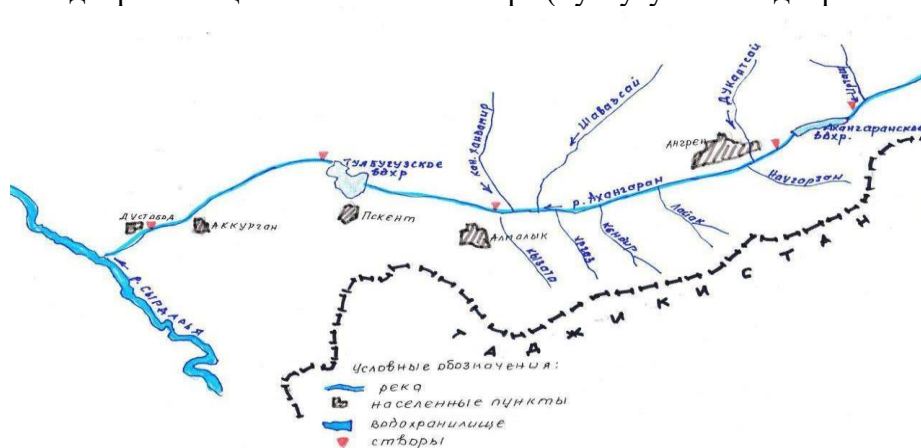


Рис. 1 Схема расположения пунктов гидрохимического контроля
Узгидромета в р. Ахангаран

В различное время наблюдения за стоком воды проводились в 6 пунктах. На сегодняшний день по р. Ахангаран наблюдения проводится в 5 пунктах. Ниже приведена схема бассейна реки с указанием постов наблюдений за стоком (Рис 1)

Рассматриваемую территорию по условиям формирования, рассеивания поверхностного речного стока, а также по категориям и критериям антропогенных нагрузок на экосистемы можно разделить на 3 основные экологические зоны: экологически благоприятную, экологически удовлетворительную и экологически неудовлетворительную [2].

Природно-климатические условия и состав земельных угодий предопределили следующие основные направления хозяйственной деятельности в бассейне: сельское хозяйство, лесное хозяйство, рекреационная деятельность, топливно-энергетическая, горнодобывающая, химическая и пищевая отрасли промышленности.

Экологически благоприятная (горная) зона делится на две подзоны. Первая подзона занимает территорию высокогорья и горной местности на высотах 1800 м над уровнем моря и выше, то есть альпийский и субальпийский пояса. Эта подзона является источником формирования пресной воды, средоточием биологического разнообразия и очагом экологической стабильности. Здесь практически отсутствует влияние антропогенных факторов.

Вторая подзона занимает среднегорные и низкогорные территории на высотах от 1800 до 900 м над уровнем моря. В бассейне Ахангарана нижняя граница этой подзоны достигает город Турк. Эта подзона, также, как и первая, расположена на территории формирования стока с малым влиянием антропогенных факторов за счет того, что в среднем и нижнем течении притоков реки Ахангаран расположены города, поселки, развито садоводство, бахчеводство и огородничество. На экологическое состояние этой зоны влияют бытовые и промышленные сточные воды, стоки животноводческих ферм и сельскохозяйственных угодий.

В бассейне Ахангарана экологически удовлетворительная (горно-предгорная) зона занимает территорию на высотах от 900 до 600 м над уровнем моря - от города Турк до города Ангрен. В этой зоне экологические риски связаны со сбросами в природные источники неочищенных коллекторно-дренажных вод, стоков коммунально-бытовых вод населенных пунктов и промышленных предприятий.

Экологически неудовлетворительная зона занимает территорию на высотах от 600 до 280 м над уровнем моря - от города Ангрен до ее устья, то есть до реки Сырдарьи. Здесь сосредоточено до 16% республиканского промышленного потенциала, где преобладает металлургическая промышленность (около 98 % черной и 94 % цветной металлургии). Кроме этого, имеются объекты хлопкоочистительной, полиграфической, мукомольной и коммунальных отраслей [1].

Промышленные предприятия загрязняют как воздушный бассейн в результате выбросов токсичных газов, содержащих окислы азота, фосфора, углерода, фтора и тяжелых металлов, так и водные источники (поверхностные и подземные) из-за сбросов в них органических веществ, биогенных элементов и солей тяжелых металлов. у. В 3-ей экологической этой зоне сосредоточена также основная сельскохозяйственная деятельность.

С целью определения сложившейся экологической ситуации в природно-хозяйственном комплексе Ахангаранского бассейна проведена оценка современного состояния его природной среды на основе результатов мониторинга загрязнения службой Узгидромета, Ташоблкомприроды, Национальный центр экологического мониторинга.

Река Ахангаран формирует качество грунтовых вод Сартамгалинского, Карахтайского и Ташского водозаборов, используемых для централизованного водоснабжения города Алмалыка и для производственных нужд Алмалыкского промышленного района. В бассейне реки функционирует Алмалыкский горно-металлургический комбинат (АГКМ) – крупнейшее в республике предприятие по добыче, переработке и извлечению цветных металлов из горных пород.

Несмотря на недостаточную изученность Ахангаран в отношении стока воды, его общие водные ресурсы могут быть оценены довольно точно, поскольку практически в устьях всех основных рек существуют или существовали стоковые посты, наблюдения на которых в основном проводились довольно длительное время. Сток пересыхающих водотоков крайне мал и не может повлиять на оценку общих ресурсов бассейна.

Самый нижний гидроствор на реки Ахангаран расположен ниже поселка Солдатское. Кроме того, ниже города Ангрен расположены Ахангаранское водохранилище суточного регулирования с полезным объемом 170 млн. м³ и Туябугузское с объемом 185 млн. м³. Последнее питается водами рек Ахангаран и Чирчик вода которого, подается по каналу

Карасу-левобережный. Поэтому режим реки Ахангаран в значительной степени искажен хозяйственной деятельностью, но все-таки основные черты реки снежно-дождевого питания сохраняются: сток за март-июнь составляют 63%, в период июль-февраль река питается грунтовыми, коллекторно-дренажными и возвратными водами. Сток за это время составляет 37%. Месяц с максимальным стоком – апрель, с минимальным – сентябрь. Известно, что изменчивость годовых расходов воды рек, искаженных хозяйственной деятельностью, существенно выше, чем природная изменчивость [2].

Несмотря на относительно высокую обеспеченность Ташкентской области водными ресурсами достаточно хорошего качества, давно назрел ряд проблем, разрешение которых требует постоянных и дорогостоящих усилий: обеспечение эффективного использования водных ресурсов в орошаемом земледелии, снижение затрат на машинный водоподъем и защиту основных водотоков от загрязнения промышленными, сельскохозяйственными и животноводческими стоками.

Анализ качества воды реки Ахангаран у установленных створов наблюдения показал высокую степень её загрязнения. В процессе транспортировки воды содержание органических веществ значительно колеблется. На начальных участках реки их содержание в воде не превышает допустимые концентрации (рис.2).

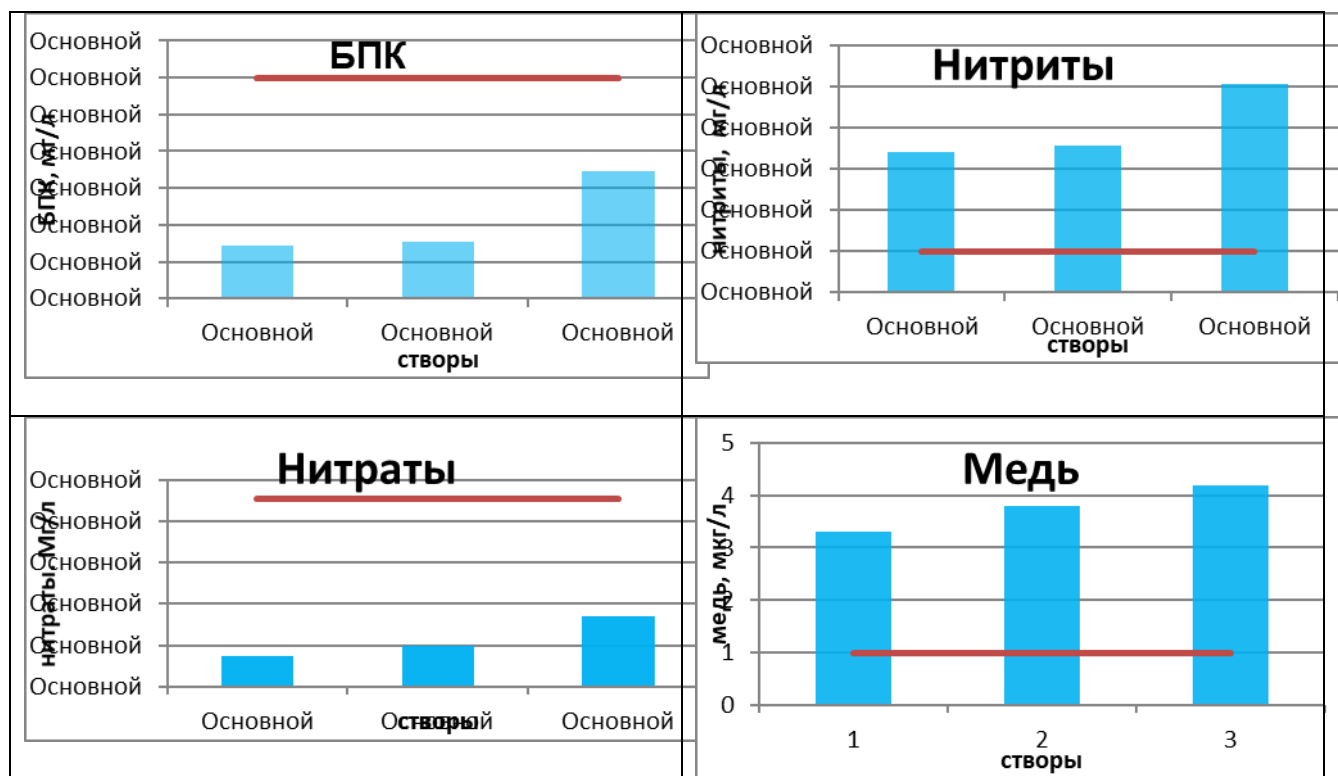


Рис.1 Динамика изменения среднегогодовой концентрации ЗВ по длине реки. Ахангаран

— концентрация ЗВ ПДК

У устья реки гидрохимический режим практически не искажен хозяйственной деятельностью человека и может считаться фоновым. В реку осуществляются сбросы множества коллекторов, коммунальных промышленных сточных вод, поэтому пункты наблюдений у дюкера Ташканала (находится в 72 км ниже реки) и пгт. Солдатское отражают то существенное антропогенное воздействие на гидрохимический режим реки, которое осуществляется ниже г. Ангрен.

В бассейне р.Ахангаран наиболее загрязнены ионами меди и нитритами в среднем течении ниже дюкеров Ташканала и канала Карасу (левобережный) у устья.

Как показывает ряд исследований [1,2,7] в биологически очищенной бытовой сточной жидкости может содержаться свыше 70 органических веществ, концентрации некоторых из них часто превышают ПДК, в том числе и для водоемов хозяйственно–питьевого назначения. Биологически очищенные производственные сточные воды могут иметь еще более сложный состав и содержать еще большее количество загрязняющих веществ



Рис.2 Влияние антропогенной деятельности на русло реки Ахангаран

Как известно на станции аэрации, сбрасывающих очищенные воды в бассейн реки Ахангаран, поступает смесь хозяйственно-бытовых городских и промышленных сточных вод (городов Ангрен, Ахангаран). Следовательно, эти сточные воды, содержащие продукты метаболизма бактерий активного ядра, а также прошедшие стадию обеззараживания активным хлором, содержат значительные количества ХПК, определенная доля которых приходится на хлорорганику. Многие из этих веществ, таких как хлорфенол, оказывают токсичное воздействие на биоценоз водоема, ингибируя процессы его самоочищения.

Нами рассмотрено содержание в воде следующих загрязняющих веществ: минерализация, содержание органических веществ (общее по химическому потреблению кислорода -ХПК и нескольких по биохимическому потреблению кислорода за 5 суток – БПК₅), соединений азота –нитритов и аммонийных, тяжелых металлов –меди, железа, цинка.

Заключение. Исследования гидрохимического режима Ахангарана показали, что специфическими загрязняющими веществами вод, чаще других превышающими ПДК, являются общее количество органических веществ (по ХПК), содержание ионов нитритов, цинка и меди.

Анализ различных факторов: временного, гидрологических и гидрохимических особенностей реки Ахангаран позволяют предположить, что на уровень загрязнения поверхностных вод реки Ахангаран нитритами в наибольшей степени влияют два фактора, а именно, водность года (реки) и объем коммунально-бытовых сбросов

Нормальная эксплуатация гидромелиоративных систем должна обеспечивать кроме указанных выше функций безопасность прилегающих территорий, коммуникаций, жилых и промышленных зон. Сложная, созданная многими поколениями людей инфраструктура ирригационных сооружений, призванная обеспечить весь природно-хозяйственный комплекс водой необходимого качества, требует постоянного поддержания в рабочем состоянии и модернизации в соответствии с растущими нуждами увеличивающегося населения и развивающегося народного хозяйства.

Список использованных источников

1. Ахмедова Т.А., Базаров Д.Р. Актуальные вопросы загрязнения поверхностных вод р. Ахангаран под влиянием антропогенных факторов // Международный научный журнал

«Центральноазиатский журнал географических исследований» 2023 г. №3-4 стр.93-105. (11.00.00. №10).

2. Видинеева Е.М, Толкачева Г.А., Верещагина Н.Г. О тенденциях загрязнения тяжелыми металлами речных вод Чирчик-Ахангаранского бассейна. Труды НИГМИ Выпуск 1(246). Проблемы экологической безопасности Узбекистан. Т.2006г.с.102-109
3. Духовный В.А., Рузиев И.Б., Николаенко В.А. Современное состояние природной среды Чирчик-Ахангаранского бассейна и мероприятия по ее охране. /Сборник научных трудов САНИИРИ., Ташкент 2006. 46-55с.
4. Ежегодник «Качество поверхностных вод и эффективность проведенных водоохранных мероприятий на территории деятельности Главгидромета» (1993- 2024 гг). - Ташкент
5. Караушев А.В. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – с. 187.
6. Келгинбаев А.А., Аллаберганов Р.Д и др. Индустриальная зона «Ангрен». Экологические аспекты. Экология хабарномаси. №5/6(145). Т. 2013, с.78
7. Ембарисов Э.И. и др. От верховья до устья.//Экологический вестник Узбекистан. 1997.№2 . с 22-24.
8. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. – Л.: Гидрометеиздат,1989. - с.333.

[DOI 10.5281/zenodo.20224824](https://doi.org/10.5281/zenodo.20224824)

SUV RESURSLARINING EKOLOGIK HOLATINI BAHOLASH VA ULARNI BOSHQARISHNING SAMARALI MEKANIZMLARI

dots. D.Q.Jumamuratov., dots. Z.T.Turlibaev
Qoraqalpogʻ davlat universiteti

Annotatsiya. Ushbu tezis arid iqlim sharoitida suv resurslarining ekologik holatini kompleks baholash va boshqaruv qarorlarini ilmiy asoslashga qaratilgan. Tadqiqotda gidrokimyoviy koʻrsatkichlar, shoʻrlanish va ifloslanish indikatorlari, ekotizim barqarorligi mezonlari hamda xavfga yoʻnaltirilgan baholash yondashuvi birlashtirildi. Yangilik sifatida maʼlumotlar cheklangan sharoitda integrallashgan indeks va moslashuvchan boshqaruv mexanizmlari taklif etildi.

Аннотация. Настоящий тезис посвящён комплексной оценке экологического состояния водных ресурсов в условиях аридного климата и научному обоснованию управленческих решений. В работе объединены гидрохимические показатели, индикаторы засоления и загрязнения, критерии устойчивости экосистем и риск-ориентированный подход к оценке. В качестве новизны предложены интегральный индекс для условий дефицита данных и адаптивные механизмы управления водопользованием.

Abstract This thesis addresses an integrated assessment of the ecological status of water resources under arid climate conditions and the scientific substantiation of management decisions. The methodology combines hydrochemical parameters, salinization and pollution indicators, ecosystem resilience criteria, and a risk-based assessment framework. As a novelty, an integrated index suitable for data-scarce settings and adaptive water governance mechanisms are proposed to enhance efficiency and ecological safety.

Kalit soʻzlar: arid hudud, suv sifati, shoʻrlanish, ifloslanish yuklamasi, ekologik indeks, xavf tahlili, moslashuvchan boshqaruv.

Ключевые слова: аридная зона, качество воды, засоление, нагрузка загрязнения, экологический индекс, анализ риска, адаптивное управление.

Keywords: arid regions, water quality, salinization, pollution load, ecological index, risk assessment, adaptive management.

Arid iqlim sharoitida suv resurslari ekologik holatining yomonlashuvi tabiiy bug‘lanishning yuqoriligi, suv almashinuvi sekinligi, qayta oqimlarning ulushi ortishi va sug‘oriladigan yerlar drenajining yetarli darajada boshqarilmasligi bilan izohlanadi. Bunday tizimlarda suv sifatidagi kichik siljishlar ham ekotizim xizmatlari, ichimlik suvi xavfsizligi va irrigatsiya samaradorligiga zanjirsimon ta‘sir ko‘rsatadi. Shu bois ekologik baholash nafaqat me‘yoriy konsentratsiyalarni tekshirish, balki suv obyektining o‘z-o‘zini tozalash salohiyati, antropogen yuklama manbalari va suv xo‘jaligi rejimining o‘zgaruvchanligini bir butun tizim sifatida ko‘rishi zarur. Mazkur tezisning maqsadi arid hududlarda suv resurslarining ekologik holatini integrallashgan yondashuv asosida baholash va boshqaruvning samarali mexanizmlarini ilmiy asoslashdan iborat bo‘lib, bunda monitoring ma‘lumotlari yetishmovchiligi sharoitida ham amaliy qaror qabul qilish imkonini beradigan ko‘rsatkichlar tizimi va moslashuvchan boshqaruv konturi taklif etiladi.

Ekologik holatni baholash metodologiyasi ikki asosiy darajaga tayandi: birinchisi, gidrokimyoviy holatni tavsiflovchi parametrlar majmuasi; ikkinchisi, suv obyektining funksional barqarorligi va xavf darajasini ifodalovchi integrallashgan ko‘rsatkichlar. Gidrokimyoviy blokda mineralizatsiya, umumiy qattqlik, asosiy ionlar (xlorid, sulfat, gidrokarbonat), biogen elementlar (ammoniy, nitrit, nitrat, fosfat), erigan kislorod va biokimyoviy kislorod sarfi kabi ko‘rsatkichlar tanlandi. Arid hududlar uchun sho‘rlanish dinamikasi alohida ahamiyatga ega bo‘lgani sababli, baholashda suvdan sug‘orishda foydalanish xavfi, tuproqning ikkilamchi sho‘rlanish ehtimoli va drenaj suvlarining qayta aralashuvi bilan bog‘liq indikatorlar kiritildi. Ushbu yondashuvning ilmiy asosida suv sifati me‘yorlari bilan bir qatorda suvning agronomik yaroqliligi va ekotizimga ta‘sirini bir vaqtning o‘zida ko‘rish tamoyili yotadi [1].

Integrallashgan baholashda an‘anaviy “bitta ko‘rsatkich-bitta xulosa” mantiqi arid hududlar murakkabligini to‘liq ochib bera olmaydi, chunki minerallashuv oshishi ba‘zan tabiiy geokimyoviy fon natijasi, ba‘zan esa irrigatsiya-drenaj tizimidagi boshqaruv nuqsoni bo‘lishi mumkin. Shu sababli tezisda xavfga yo‘naltirilgan baholash yondashuvi qo‘llanildi: xavf manbai, ta‘sir yo‘li, qabul qiluvchi (aholi, agroekotizim, gidrobiotsenoz) va oqibat og‘irligi zanjiri alohida tahlil qilindi. Bu yerda “xavf” faqat toksikologik ma‘noda emas, balki resursning funksional yaroqliligi pasayishi (masalan, sug‘orish samaradorligi tushishi, suv o‘tkazgichlarda cho‘kma va korroziya kuchayishi, suv o‘simliklari bilan qoplanish) kabi jarayonlarni ham qamrab oladi [2]. Natijada ekologik holat “me‘yordan oshdi-oshmadi” kabi ikkilik baholashdan ko‘ra, boshqaruv uchun qulay bo‘lgan ustuvorliklar xaritasini beradi: qaysi uchastkada qaysi jarayon dominant, qaysi choralalar eng katta samara beradi.

Ma‘lumotlar cheklangan sharoitda integrallashgan indeksni shakllantirish uchun ko‘rsatkichlarni normallashtirish, vaznlash va agregatsiyalash bosqichlari asoslandi. Normallashtirishda sanitariya-ekologik me‘yorlar bilan birga fon konsentratsiyalarning hududiy farqlari ham hisobga olinishi lozim, chunki arid mintaqalarda tabiiy mineralizatsiya yuqori bo‘lishi mumkin va me‘yoriy yondashuv noto‘g‘ri “doimiy yomon holat” xulosasiga olib keladi. Vaznlash bosqichida ko‘rsatkichlar ta‘sir og‘irligi va qaytaruvchanlik darajasiga ko‘ra guruhlandi: biogen yuklama odatda tezroq boshqariladi, ammo kislorod rejimining buzilishi qisqa muddatda ham ekotizimga kuchli zarba beradi; sho‘rlanish esa sekin shakllansa-da, qaytarish qimmat va uzoq. Shu mantiq asosida indeksning ilmiy talqini boshqaruv resurslarini to‘g‘ri taqsimlashga xizmat qiladi. Indeks natijalari fazoviy tahlil bilan bog‘langanda (suv olish nuqtalari, qayta oqimlar kirish joylari, drenaj kollektorlar) ifloslanish va sho‘rlanishning “issiq nuqtalari” aniqlanadi hamda manba-oqibat bog‘liqligi mustahkamlanadi [3].

Arid hududlarda suv resurslari ekologik holatiga eng katta bosim sug‘oriladigan dehqonchilikning texnologik rejimi, suv taqsimoti intizomi va kollektor-drenaj tarmoqlarining ishlashiga to‘g‘ri keladi. Sug‘orish samaradorligi past bo‘lganda infiltratsiya ortadi, yer osti suvlari sathi ko‘tariladi, tuproq sho‘rlanishi kuchayadi va natijada drenaj oqimlari mineralizatsiyalashgan holda qayta suv

obyektlariga tushadi. Bu jarayonni ekologik boshqaruv nuqtayi nazaridan “ichki kontur” deb talqin qilish mumkin: suv xo‘jaligi tizimi o‘zida hosil qilgan tuz va ifloslanish yuklamasini yana o‘z suv manbalariga qaytaradi. Shuning uchun boshqaruv mexanizmlari faqat suv olishni cheklash bilan emas, balki suvdan foydalanish texnologiyasini optimallashtirish, qayta oqimlarni kamaytirish va ularni ekologik jihatdan maqbul tarzda utilizatsiya qilish bilan bog‘lanishi kerak [4].

Taklif etilayotgan samarali mexanizmlar uch qatlamga ajratildi: institutsional, iqtisodiy va texnologik. Institutsional qatlamda havza tamoyili asosida boshqaruvni kuchaytirish, manfaatdor tomonlar (suv foydalanuvchilar uyushmalari, kommunal xizmatlar, sanoat, ekologik nazorat) o‘rtasida ma‘lumot almashish va javobgarlik chegaralarini aniq belgilash muhim. Arid hududlarda suv taqchilligi fonida ekologik talablarga rioya qilish ko‘pincha “ikkinchi darajali” masala sifatida qaraladi; amalda esa ekologik cheklovlar buzilganda resursning o‘zi yaroqsizlanib, ijtimoiy-iqtisodiy zarar yanada ortadi. Shuning uchun boshqaruv konturida ekologik limitlar (masalan, kollektor-drenaj oqimlari mineralizatsiyasi va biogen yuklamasi bo‘yicha) operativ qarorlar bilan bog‘langan bo‘lishi, monitoring natijasi esa boshqaruv ko‘rsatkichiga aylanishi lozim [5].

Iqtisodiy qatlamda suvdan foydalanish samaradorligini rag‘batlantiruvchi, ifloslanish yuklamasini kamaytirishga undovchi differensial to‘lov va kompensatsiya mexanizmlari asosli hisoblanadi. Bu mexanizm arid hududlarda ijtimoiy sezgir bo‘lgani sababli, uni “jarima” logikasiga emas, balki “foydali natijani qo‘llab-quvvatlash” tamoyiliga tayanib bosqichma-bosqich joriy etish talab etiladi: suv tejovchi texnologiyalarni subsidiyalash, drenaj suvlarini qayta foydalanish loyihalarini qo‘llab-quvvatlash, suv sifati yaxshilangan uchastkalarda ishlab chiqarish xavflarining kamayishi orqali iqtisodiy foydani ko‘rsatish. Muhimi, iqtisodiy mexanizm ekologik indikatorlar bilan o‘lchanadigan bo‘lishi kerak, aks holda u faqat deklarativ qoladi. Shu nuqtada integrallashgan indeks boshqaruv “tili” vazifasini bajaradi: u murakkab ko‘rsatkichlar majmuasini bitta boshqariladigan mezonga keltiradi va natijani vaqt bo‘yicha solishtirish imkonini beradi [6].

Texnologik qatlamda monitoringni modernizatsiya qilish va ma‘lumotlar sifatini oshirish ustuvor yo‘nalish bo‘ldi. Arid hududlarda stasionar kuzatuv tarmoqlari siyrak, mavsumiylik kuchli va ekstremal hodisalar (qurg‘oqchilik, sho‘r to‘lqinlar) tez-tez uchrashi mumkin. Shuning uchun tezis doirasida minimal xarajatli, ammo yuqori foydali yechim sifatida gibrid monitoring konsepsiyasi asoslanadi: asosiy nuqtalarda laborator tahlillar, qo‘shimcha nuqtalarda tezkor sensorlar, hamda masofadan zondlash ma‘lumotlari yordamida sho‘rlanish va suv yuzasi holatini bilvosita baholash. Bunda ma‘lumotlarni birlashtirishda noaniqlikni hisobga olish, ya‘ni “aniq qiymat” emas, “ishonchlilik oralig‘i” bilan qaror qabul qilish amaliyoti taklif etiladi. Bu yondashuv arid hududlarda resurslar cheklangan sharoitda ilmiy asoslangan ehtiyotkor boshqaruvni ta‘minlaydi [7]. Tezisning yakuniy xulosasi. Arid iqlimda suv resurslarining ekologik holatini baholash samaradorligi ko‘rsatkichlarni alohida-alohida tekshirish bilan emas, balki sho‘rlanish, biogen yuklama va kislorod rejimi kabi jarayonlarni yagona tizimda ko‘rishga bog‘liq ekanligi asoslandi. Xavfga yo‘naltirilgan va integrallashgan indeksga tayangan yondashuv “issiq nuqtalar”ni aniqlash, ustuvor choralarni tanlash va natijani dinamik nazorat qilish imkonini beradi. Boshqaruvning samarali mexanizmlari institutsional muvofiqlashtirish, ekologik natijaga bog‘langan iqtisodiy rag‘batlar va gibrid monitoringni uyg‘unlashtirganda yuzaga chiqadi; aynan shu uchlik suv resurslarining ekologik barqarorligini saqlash bilan birga suvdan foydalanish samaradorligini ham oshiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Ikromov A. I., Raxmatov B. R. O‘zbekiston sharoitida suv sifati va sug‘orish suvlari sho‘rlanishini baholash asoslari. Toshkent, Fan, 2019. 192 b.
2. Alekin O. A. Osnovy gidrokhimii. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970. 444 s.
3. Shiklomanov I. A. Vodnye resursy: ocenka, prognoz, upravlenie. Sankt-Peterburg, Nauka, 2008. 280 s.

4. Dukhovny V. A., Sokolov V. I. Integrated Water Resources Management in Central Asia. Tashkent, SIC ICWC, 2003. 256 p.
5. Mavlonov A. A., Karimov A. A. Suv resurslarini havza asosida boshqarish: nazariya va amaliyot. Samarqand, Samarqand universiteti nashriyoti, 2021. 168 b.
6. OECD. Water Governance in Central Asia: Frameworks, Practices and Challenges. Paris, OECD Publishing, 2019. 180 p.
7. UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. Paris, UNESCO, 2020. 219 p.

[DOI 10.5281/zenodo.20236659](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236659)

A Bathymetry-Independent Framework for Reconstructing Reservoir Operational Regimes from Satellite-Derived Surface Dynamics

Shoira Umarova^{1,a)}, Umuridin Dalabaev¹ and Malika Ikramova²

Author Affiliations:

¹University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

²Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Uzbekistan

Author Emails: a)shumarova@uwed.uz

Abstract. Reservoir operation plays a critical role in water resources management, yet operational data such as storage volumes, release schedules, and bathymetric information are often unavailable, particularly in data-scarce regions. This limitation constrains the application of conventional hydrological and management models, which typically rely on detailed system information.

This study proposes a primarily bathymetry-independent framework for reconstructing reservoir operational regimes using satellite-derived surface water dynamics. In addition, an auxiliary area–volume relationship derived from historical data is used to evaluate the physical consistency of the surface-based storage proxy. The approach is based on time series of reservoir surface area obtained from Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) observations. A normalized storage index is introduced to represent relative changes in reservoir storage, and its temporal derivative is used to identify phases of storage and release without requiring absolute volume estimates.

The method is applied to the Chimkurgan Reservoir as a representative irrigation-controlled system. The results reveal a clear seasonal operational pattern characterized by reservoir filling during winter and early spring, followed by pronounced depletion during the irrigation season. The transition between these phases is captured without the use of bathymetric data or operator records, demonstrating the capability of the proposed framework to infer management behavior directly from satellite observations.

The proposed approach provides a simple, transferable, and data-efficient tool for analyzing reservoir operation in data-scarce environments. It can be applied to a wide range of reservoirs globally, supporting water management studies where conventional data sources are limited or unavailable.

1. INTRODUCTION

Reservoirs play a critical role in water resources management by regulating streamflow, supporting irrigation, and ensuring water supply under variable hydrological conditions. Understanding reservoir operational regimes is therefore essential for both scientific analysis and practical water management. However, in many regions of the world, particularly in data-scarce environments, detailed information on reservoir operation—such as storage volumes, release schedules, and bathymetric characteristics—is often unavailable or incomplete.

In recent years, satellite remote sensing has emerged as a powerful tool for monitoring surface water dynamics. Recent advances in satellite hydrology have demonstrated the potential of remote sensing for monitoring water storage and dynamics in reservoirs and river systems (Biancamaria et al., 2016; Gao et al., 2012; Turner et al., 2021). Time series of water surface area derived from optical and synthetic aperture radar (SAR) imagery have been widely used to characterize lake and reservoir variability, assess hydrological changes, and reconstruct storage dynamics. Several studies have demonstrated that satellite observations can be combined with auxiliary data and hydrological models to

estimate reservoir inflows, storage variations, and release patterns. These approaches have significantly expanded the ability to monitor water systems in regions lacking in situ observations.

Despite these advances, most existing methods rely on additional data sources such as bathymetric surveys, water level measurements, or calibrated hydrological models. Such requirements limit their applicability in data-scarce regions, where detailed information on reservoir geometry and operational records is often unavailable. Moreover, model-based approaches typically involve parameter calibration and introduce additional sources of uncertainty, which can affect the robustness and transferability of the results.

At the same time, there is growing interest in developing simplified and robust approaches that rely on minimal data inputs while still capturing essential system behavior. Surface water extent represents a fundamental observable that directly reflects changes in reservoir storage and operational conditions. However, its potential for direct interpretation of reservoir operational regimes—without explicit reconstruction of absolute storage volumes—remains insufficiently explored.

Recent studies have demonstrated the potential of satellite remote sensing for monitoring reservoir dynamics, including surface water extent and storage variability (Bonnema and Hossain, 2019; Yigzaw et al., 2023). Time series of reservoir surface area derived from optical and SAR imagery have been widely used to reconstruct storage changes and assess hydrological variability. In more advanced approaches, satellite-derived storage estimates are combined with hydrological models to infer reservoir inflows and releases (Busker et al., 2019). These approaches often rely on auxiliary datasets or model calibration, which limits their applicability in data-scarce environments (Yoon, Y., et al., 2016).

However, many existing methods rely on bathymetric data, water level observations, or calibrated models, which limits their applicability in data-scarce regions. In addition, global reservoir operation models often require predefined rules and parameterization schemes (Hanasaki et al., 2006), which may not accurately reflect local operational practices.

In this study, we propose a bathymetry-independent framework for reconstructing reservoir operational regimes using only satellite-derived surface water dynamics. The approach is based on time series of reservoir surface area obtained from Sentinel-1 SAR observations. A normalized storage index is introduced to represent relative storage dynamics, and its temporal derivative is used to identify periods of storage and release. Unlike conventional methods, the core framework does not require bathymetric data, water level measurements, or operational records. In this study, an auxiliary area–volume relationship derived from historical data is additionally used to assess the physical consistency of the surface-based storage proxy.

The method is demonstrated using the Chimkurgan Reservoir as a representative irrigation-controlled system in a data-scarce region. While the case study provides a practical illustration, the primary contribution of this work lies in the development of a transferable framework that can be applied to a wide range of reservoirs globally.

The proposed approach contributes to the growing body of research on satellite-based hydrological monitoring by providing a simple, data-efficient, and scalable method for analyzing reservoir operation under limited data conditions. Unlike existing approaches, this study focuses on direct reconstruction of operational regimes from surface dynamics without intermediate volume estimation or model calibration.

2. STUDY AREA AND DATA

The proposed framework is demonstrated using the Chimkurgan Reservoir, located in the Kashkadarya River basin in southern Uzbekistan. The reservoir is an in-stream system primarily designed for irrigation purposes and plays a key role in regulating seasonal water availability in the region (Figure 1).

The hydrological regime of the reservoir is characterized by pronounced seasonal variability. Water inflow is mainly driven by winter and spring precipitation and upstream runoff, while water demand is dominated by irrigation during the summer growing season. As a result, the reservoir typically experiences filling during late winter and early spring, followed by depletion during summer months.

The study area represents a typical example of a data-scarce reservoir system, where detailed information on bathymetry, water levels, and operational releases is limited or unavailable. This makes it a suitable case for testing satellite-based approaches that rely on minimal input data.

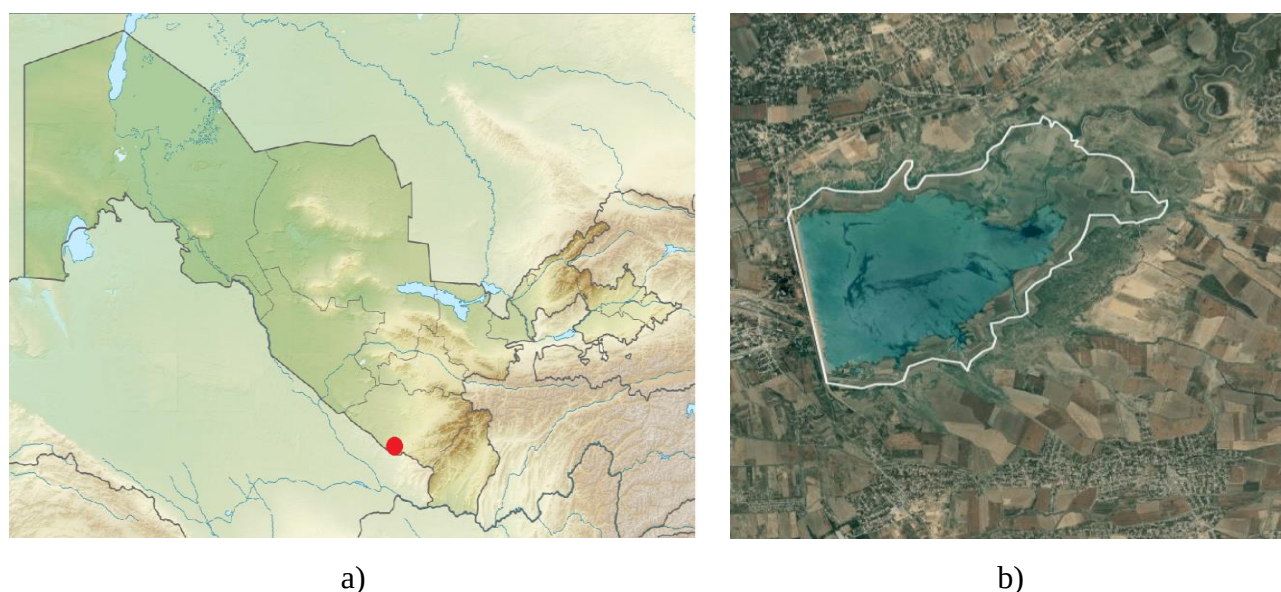


Figure 1. Location of the Chimkurgan Reservoir and the study area.

(a) Geographic location of the reservoir in Uzbekistan.

(b) Satellite image of the reservoir used for the analysis.

Reservoir surface water dynamics were derived from Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) observations. Sentinel-1 provides all-weather, day-and-night imaging capabilities, which makes it particularly suitable for monitoring water bodies in regions affected by cloud cover.

The Sentinel-1 Ground Range Detected (GRD) dataset was used, with the VV polarization selected for water detection. The dataset was filtered to include images acquired between 2017 and 2025, ensuring consistent temporal coverage and sufficient observation frequency. The analysis period was selected starting from 2017 to ensure consistent temporal coverage and sufficient observation frequency provided by the Sentinel-1 mission. The chosen period ensures a balance between temporal length and data quality. Earlier observations were excluded due to lower data availability and reduced temporal consistency, which could affect the reliability of monthly composites. Monthly composite images were generated by applying a median reduction to all available observations within each month. This approach reduces speckle noise and improves the robustness of water detection.

Water bodies were identified using a threshold-based classification applied to the backscatter coefficient. Water surfaces exhibit lower backscatter values in SAR imagery, allowing for their separation from surrounding land areas. To improve classification accuracy, a spatial filtering procedure was applied to remove isolated pixels and reduce noise. The final water mask was used to calculate the surface water area within the reservoir boundary for each monthly composite. The resulting time series of reservoir surface area $A(t)$ was used as the primary input for subsequent analysis.

To ensure data quality, months with insufficient satellite observations were excluded from the analysis. Only months with at least three Sentinel-1 images were retained, providing a balance between temporal resolution and reliability. The resulting dataset consists of a continuous monthly time series of reservoir surface area covering the period 2017–2025. This dataset forms the basis for the reconstruction of storage dynamics and operational regimes in the following sections.

Table 1 — Summary of dataset

Variable	Description	Unit	Source
$A(t)$	Reservoir surface area	km^2	Sentinel-1
$S^*(t)$	Normalized storage index	—	Derived
$\Delta S^*(t)$	Storage change rate	—	Derived
n_images	Number of SAR images per month	—	Sentinel-1

Period	2017–2025	—	—
--------	-----------	---	---

The dataset summarized in Table 1 forms the basis for reconstructing reservoir storage dynamics and operational regimes. The surface area time series $A(t)$ represents the primary observable derived from satellite data, while the normalized storage index $S^*(t)$ and its temporal variation $\Delta S^*(t)$ are computed to characterize relative storage changes and operational behavior.

Although the dataset does not include bathymetric information or direct measurements of water levels and releases, it provides sufficient information to capture the temporal structure of reservoir dynamics. The combination of satellite-derived surface area and derived indicators enables a data-efficient representation of storage variability, which is particularly suitable for data-scarce environments.

In the following section, these variables are used to develop a framework for identifying reservoir operational regimes based on temporal patterns in storage dynamics.

This approach avoids the need for explicit volume reconstruction while preserving the essential dynamics of reservoir operation.

3. METHODOLOGY

3.1 Overview of the Framework

The proposed framework aims to reconstruct reservoir operational regimes using satellite-derived surface water dynamics without requiring bathymetric data or operational records. The method is based on the analysis of temporal variations in reservoir surface area and consists of four main steps: (1) extraction of surface water area, (2) normalization of storage dynamics, (3) estimation of temporal changes, and (4) classification of operational regimes.

A schematic representation of the workflow is shown in Figure 2.

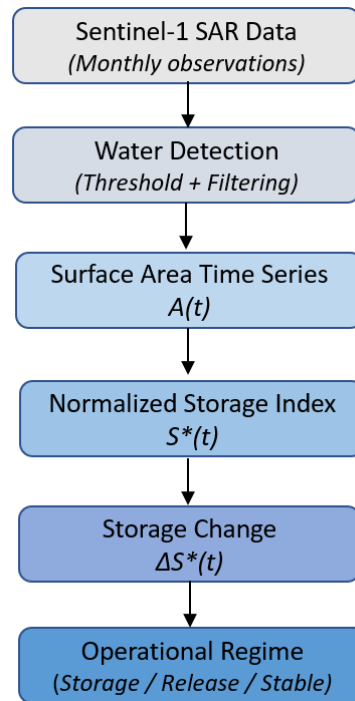


Figure 2. Conceptual framework for reconstructing reservoir operational regimes from satellite-derived surface water dynamics under data-scarce conditions.

3.2 Surface Area Time Series

The primary observable used in this study is the reservoir surface area, denoted as $A(t)$, derived from monthly Sentinel-1 SAR composites. For each month, a median composite was generated from all available SAR observations, and a threshold-based classification was applied to identify water pixels.

The surface water area $A(t)$ was calculated by summing the area of pixels classified as water within the reservoir boundary:

$$A(t) = \sum_i a_i$$

where a_i represents the area of individual pixels classified as water.

3.3 Normalized Storage Index

Since bathymetric data and water level measurements are not available, absolute storage volume cannot be directly estimated. To overcome this limitation, a normalized storage index $S^*(t)$ is introduced to represent relative storage dynamics:

$$S^*(t) = \frac{A(t) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$$

where $A_{\min}$ and $A_{\max}$ are the minimum and maximum observed surface areas over the study period.

This normalization constrains the storage index to the range [0,1], allowing for consistent comparison of storage dynamics over time.

3.4 Temporal Change in Storage

The temporal variation in storage is quantified using the first-order difference of the normalized storage index:

$$\Delta S^*(t) = S^*(t) - S^*(t-1)$$

This quantity represents the relative change in storage between consecutive time steps and serves as a proxy for the balance between inflow and outflow processes.

3.5 Classification of Operational Regimes

Reservoir operational regimes are identified based on the sign and magnitude of $\Delta S^*(t)$. Three distinct regimes are defined:

- Storage phase ($\Delta S^*(t) > \tau$): net accumulation of water
- Release phase ($\Delta S^*(t) < -\tau$): net depletion of water
- Stable phase ($|\Delta S^*(t)| \leq \tau$): near-equilibrium conditions

where τ is a threshold parameter used to reduce the influence of noise and minor fluctuations in the normalized storage change time series. A sensitivity analysis was conducted by testing threshold values in the range of 0.01 – 0.05. Values of $|\Delta S^*(t)|$ below 0.02 were found to correspond to small variations primarily associated with noise, while larger values reflect meaningful storage or release processes. The selected value $\tau = 0.02$ provides a balance between filtering noise and preserving significant storage dynamics and was therefore adopted in this study. The results were found to be stable for threshold values within this range.

3.6 Seasonal Aggregation

To characterize the seasonal behavior of the reservoir, the monthly average of $\Delta S^*(t)$ was computed across the entire study period:

$$\bar{\Delta S^*}(m) = \frac{1}{N_m} \sum \Delta S^*(t)$$

where m denotes the month and N_m is the number of observations for that month.

This aggregation enables the identification of dominant seasonal patterns in reservoir operation.

To ensure the reliability of the analysis, only months with at least three Sentinel-1 observations were included. This criterion reduces uncertainty associated with insufficient sampling and improves the robustness of the derived time series.

3.7 Area–volume relationship

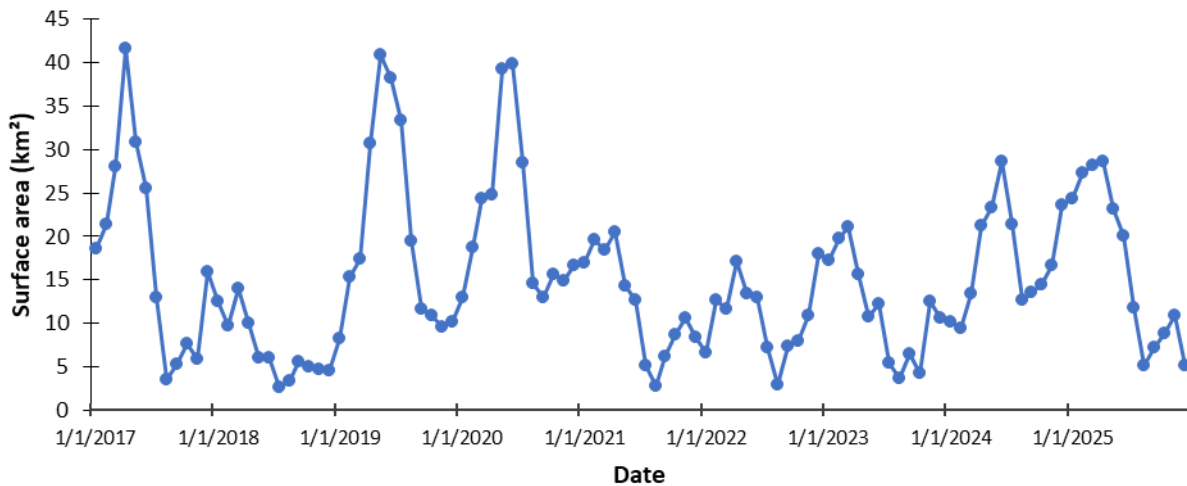
To provide a physically interpretable representation of storage dynamics, an auxiliary area–volume relationship was derived from historical reservoir data (Gapparov et al., 2020). The relationship between surface area and storage volume was approximated by a second-order polynomial function with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.9987$). This relationship enabled direct transformation of the satellite-derived surface area time series into storage volume and the construction of a volume-based normalized storage index $S_c(t)$.

To distinguish it from the area-based normalized storage index $S^*(t)$, the volume-based index is denoted as $S_c(t)$, where the subscript c indicates a calibrated representation of storage dynamics derived from the area–volume relationship.

4. RESULTS

4.1 Temporal variability of reservoir surface area

The temporal variability of reservoir surface area derived from Sentinel-1 observations is presented in Figure 3. The updated time series reveals pronounced seasonal fluctuations with a significantly larger dynamic range compared to initial estimates.



Fig

ure 3. Temporal variability of reservoir surface area derived from Sentinel-1 observations.

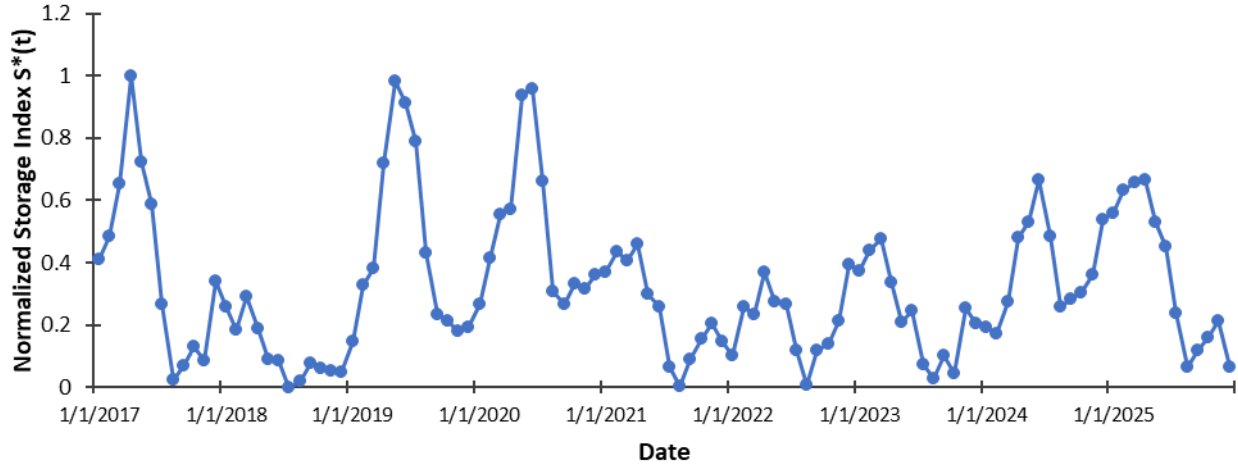
The surface area varies from less than 5 km² during low storage conditions to more than 40 km² during peak filling periods. The maximum observed values approach the reported design characteristics of the reservoir, indicating that the refined water detection and boundary definition adequately capture the full spatial extent of the reservoir.

A clear and consistent annual cycle is observed throughout the study period (2017–2025). Surface area increases during late winter and early spring, corresponding to reservoir filling, followed by a sharp decline during summer months associated with irrigation water release.

Despite interannual variability in peak magnitude, the seasonal pattern remains stable across years, reflecting a strongly regulated operational regime. The improved representation of maximum surface extent enhances the physical reliability of the reconstructed dynamics. The refinement of the reservoir boundary based on maximum observed water extent significantly improved the accuracy of surface area estimation, particularly during high-storage conditions.

4.2 Normalized storage dynamics

The normalized storage index $S^*(t)$, shown in Figure 4, provides a consistent representation of relative storage variations. The use of updated surface area data improves the robustness of normalization and reduces bias associated with underestimation of maximum reservoir extent.



Fig

ure 4. Normalized storage index representing relative reservoir storage dynamics.

The time series demonstrates a clear pattern of storage accumulation during winter and early spring, with values approaching 1, followed by a rapid decrease during the irrigation season when $S^*(t)$ approaches zero.

The normalization enables comparison across different years while preserving the intrinsic temporal structure of reservoir dynamics.

4.3 Storage change and operational signals

The temporal variation of storage change $\Delta S^*(t)$, presented in Figure 5, provides direct insight into reservoir operation. Positive values indicate periods of storage accumulation, while negative values correspond to water release.

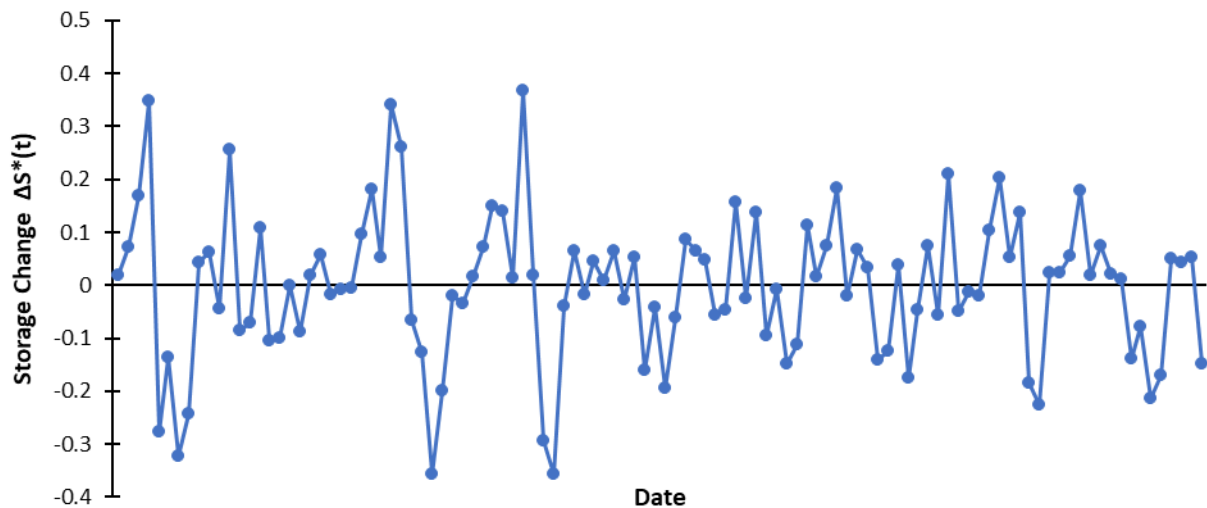


Figure 5. Temporal variation of storage change, indicating periods of storage and release.

The updated dataset reveals more pronounced storage and release signals, reflecting the improved representation of reservoir extent. Periods of positive $\Delta S^*(t)$, are predominantly observed from December to April, while strong negative values occur during summer months, particularly from June to August.

The magnitude of negative peaks exceeds that of positive ones, indicating more rapid depletion compared to accumulation. This asymmetry reflects irrigation-driven operational priorities.

4.4 Volume dynamics

The reservoir storage volume was reconstructed using a polynomial area–volume relationship derived from historical data. The relationship between surface area and volume was approximated by a second-order function ($R^2 = 0.9987$), enabling direct transformation of the satellite-derived surface area time series into storage volume. The resulting volume time series exhibits a nonlinear response to changes in surface area, reflecting the morphometric characteristics of the reservoir basin. High-storage conditions are amplified due to basin geometry, while low-storage variations remain relatively moderate.

The reconstructed volume dynamics closely follow the temporal patterns observed in surface area, with gradual accumulation during winter and early spring and rapid depletion during the irrigation season.

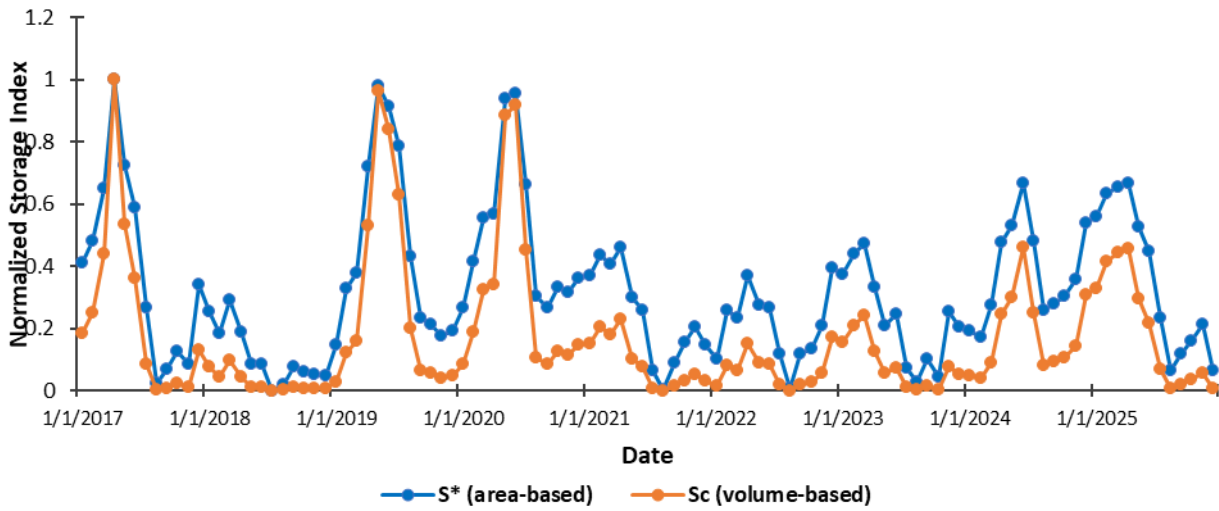


Figure 6. Temporal dynamics of normalized storage indices derived from surface area (S^*) and volume-based (S_c) approaches.

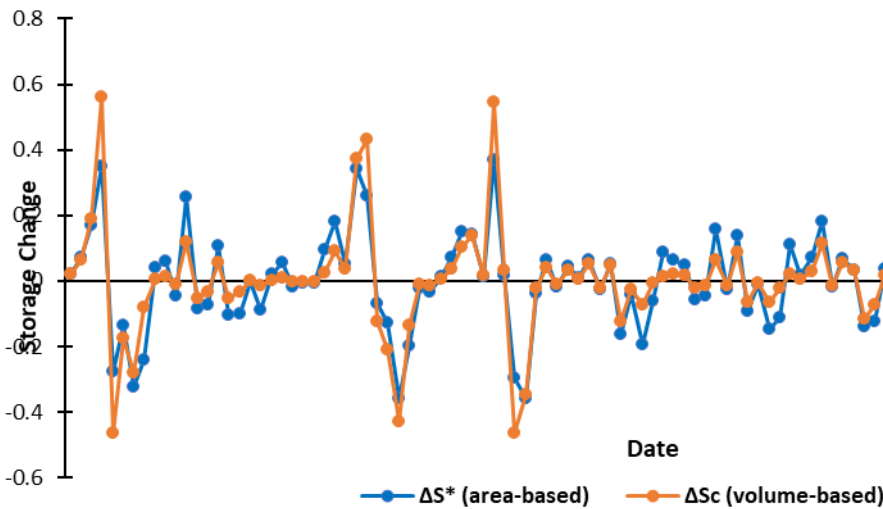


Figure 7. Temporal variation of storage change derived from surface area (ΔS^*) and volume-based (ΔS_c) indices.

4.5 Comparison of indices and Seasonal operational regime

The storage change series $\Delta S^*(t)$ and $\Delta S_c(t)$ exhibit nearly identical patterns, with matching peaks and transitions throughout the study period. Minor differences between the indices are associated with the nonlinear relationship between surface area and volume.

These results confirm that surface area dynamics alone provide a reliable proxy for reservoir storage behavior, even without explicit volume reconstruction. The seasonal pattern of reservoir operation is summarized in Figure 6 and Table 2. The updated analysis confirms a well-defined seasonal regime with consistent timing and magnitude.

Table 2 — Seasonal characteristics

Month	Mean $\Delta S^*(t)$	Regime	Mean $\Delta S_c(t)$	Regime
	0,0059		0,0022	
	0,0751	Storage	0,0534	storage
	0,0640	Storage	0,0548	storage
	0,0959	Storage	0,1203	storage
	-0,0238	Release	0,0121	
	-0,0158		-0,0214	
	-0,1936		-0,1691	
	-0,1721		-0,1247	
	0,0234	Storage	-0,0079	
	0,0204	Storage	0,0095	
	0,0375	Storage	0,0157	
Dec	0,0469	Storage	0,0377	storage

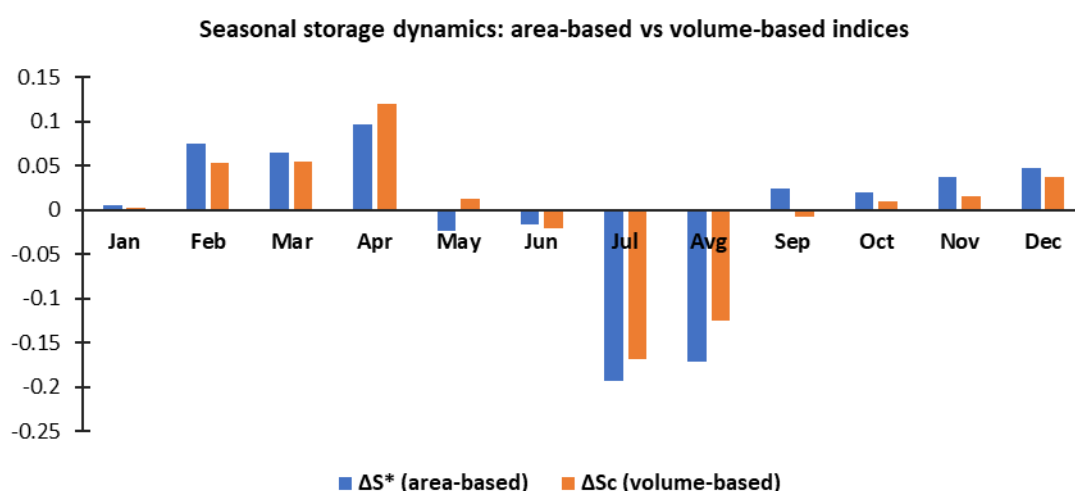


Figure 8. Seasonal pattern of reservoir operation based on monthly averaged storage change.

Strong positive values in February–April indicate dominant storage conditions, while near-zero values in May–June correspond to transition phases. The most intense release occurs during July and August, reflecting peak irrigation demand. Moderate recovery is observed in autumn months, indicating partial replenishment before the next cycle. The

improved dataset enhances the clarity of seasonal signals while preserving the overall structure of the operational regime.

A comparison between the area-based normalized storage index $S^*(t)$ and the volume-based index $S_c(t)$ shows strong agreement in temporal dynamics. Both indices consistently capture the timing of storage accumulation and release phases.

Similarly, the storage change series $\Delta S^*(t)$ and $\Delta S_c(t)$ exhibit nearly identical patterns, with matching peaks and transitions throughout the study period. Minor differences between the indices are associated with the nonlinear relationship between surface area and volume.

These results confirm that surface area dynamics alone provide a reliable proxy for reservoir storage behavior. The additional area–volume relationship further supports the physical consistency of the reconstructed dynamics.

DISCUSSION

The results demonstrate that reservoir operational regimes can be effectively reconstructed using only satellite-derived surface water dynamics, even in the absence of bathymetric data and in situ observations. The improved representation of reservoir surface area, achieved through refinement of the reservoir boundary and water detection parameters, significantly enhances the physical consistency of the analysis.

The updated surface area time series captures a wider dynamic range, with maximum values exceeding 40 km² and approaching reported design characteristics of the reservoir. This agreement provides indirect validation of the methodology and confirms that the satellite-based approach adequately represents the full spatial extent of the reservoir under varying storage conditions.

The observed temporal patterns reveal a highly regulated system driven by irrigation demand. The clear separation between storage and release phases, as well as their consistent seasonal timing, indicates that the reservoir operates under stable management rules. The asymmetry between accumulation and depletion phases—characterized by more rapid drawdown during summer—reflects operational priorities typical for irrigation-controlled systems in arid and semi-arid regions.

Compared to conventional approaches that rely on storage–elevation relationships or calibrated hydrological models, the proposed framework offers a fundamentally different perspective. By focusing on relative dynamics rather than absolute storage estimation, the method avoids uncertainties associated with bathymetric data, parameter calibration, and model structural assumptions. This makes the approach particularly suitable for data-scarce environments, where traditional modeling frameworks are often not applicable.

At the same time, the results highlight the importance of accurate delineation of reservoir boundaries. The comparison between initial and refined surface area estimates demonstrates that underestimation of maximum reservoir extent can significantly affect the interpretation of storage dynamics. This finding underscores the need to account for the full range of water extent variability when using satellite-derived data.

Despite its simplicity, the proposed method captures both intra-annual variability and interannual consistency in reservoir behavior. The robustness of the reconstructed patterns suggests that surface area dynamics alone contain sufficient information to infer key aspects of reservoir operation. This supports the broader hypothesis that observable surface dynamics can serve as a proxy for internal system processes.

Several limitations should be acknowledged. First, the core surface-based framework is designed to reconstruct relative storage dynamics rather than direct in situ-validated absolute storage volumes. Although an auxiliary area–volume relationship was used to derive physically interpretable storage estimates, these estimates remain dependent on historical morphometric data. Second, the accuracy of water detection depends on the selection of classification thresholds and may be affected by SAR backscatter variability, particularly in shallow or vegetated areas. Third, the threshold parameter τ introduces a degree of subjectivity, although sensitivity analysis indicates that the results remain stable within a reasonable range.

Future work may focus on extending the framework to multiple reservoirs, integrating additional satellite datasets (e.g., optical imagery or altimetry), and combining the approach with simplified morphometric models to enable approximate volume estimation. Such developments could further enhance the applicability of the method for large-scale water resource monitoring.

The strong agreement between area-based and volume-based indices demonstrates that surface dynamics contain sufficient information to infer reservoir operational behavior. This finding supports the use of simplified, observation-driven approaches in data-scarce environments, where conventional hydrological data are unavailable.

Overall, the proposed framework provides a simple, robust, and transferable approach for analyzing reservoir operation under limited data conditions. The results demonstrate that meaningful insights into operational behavior can be derived directly from satellite observations, without reliance on detailed system information.

CONCLUSION

This study presents a satellite-based framework for reconstructing reservoir operational regimes using surface area dynamics derived from Sentinel-1 SAR imagery. The results demonstrate that key features of reservoir behavior, including storage, release, and transition phases, can be reliably identified without the need for bathymetric data or in situ observations.

The refined methodology, incorporating improved reservoir boundary delineation and optimized water detection parameters, enables accurate representation of the full spatial extent of the reservoir. The reconstructed surface area time series reaches values exceeding 40 km², consistent with reported reservoir characteristics, confirming the physical reliability of the approach.

The analysis reveals a stable and strongly seasonal operational regime governed by irrigation demand. Storage accumulation occurs during winter and early spring, followed by rapid depletion in summer, with consistent patterns observed across multiple years. The normalized storage index and its temporal derivatives provide a simple yet effective means of capturing these dynamics.

A key contribution of this study is the demonstration that relative surface area variations can serve as a robust proxy for reservoir storage dynamics. By avoiding reliance on detailed bathymetric information and complex hydrological modeling, the proposed framework offers a practical solution for monitoring reservoirs in data-scarce regions.

The approach is computationally efficient, transferable, and suitable for large-scale applications. It can be readily extended to other reservoirs and integrated with additional satellite data sources to enhance monitoring capabilities.

The integration of an area–volume relationship further enhances the physical interpretability of the proposed framework, bridging the gap between satellite observations and hydrological quantities.

Overall, the study highlights the potential of satellite observations to provide meaningful insights into reservoir operation and supports the development of simplified, observation-driven methods for water resource analysis.

REFERENCES

1. Gao, H., et al. (2012). Estimating reservoir storage from satellite remote sensing: A case study. *Water Resources Research*, 48, W09503.
2. Yoon, Y., et al. (2016). Estimating river discharge from satellite observations. *Journal of Hydrology*, 540, 233–247.
3. Biancamaria, S., Lettenmaier, D. P., & Pavelsky, T. M. (2016). The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, 37, 307–337.
4. Bonnema, M., & Hossain, F. (2019). Satellite-based reservoir monitoring: A review of recent advances and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 221, 44–58.
5. Busker, T., et al. (2019). A global model for predicting reservoir storage dynamics from satellite observations. *Journal of Hydrology*, 575, 123–135.
6. Hanasaki, N., Kanae, S., & Oki, T. (2006). A reservoir operation scheme for global river routing models. *Journal of Hydrology*, 327(1–2), 22–41.
7. Yigzaw, W., et al. (2023). Monitoring reservoir surface water dynamics using satellite remote sensing: Recent developments and applications. *Remote Sensing*, 15, 1234.
8. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422.
9. Donchyts, G., et al. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6, 810–813.
10. Zhao, G., Gao, H., Naz, B. S., Kao, S. C., & Voisin, N. (2017). Integrating remote sensing data into reservoir operation modeling. *Water Resources Research*, 53, 967–982.
11. Crétaux, J. F., et al. (2011). Lake and reservoir monitoring from satellite altimetry and remote sensing. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(11–12), 637–650.
12. M. Ikramova, Sh.Umarova, I.Ahmedkhodjaeva. Charvak reservoir modeling based on geoinformation systems. *E3S Web of Conferences* 401, 02007 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340102007>

13. Turner, S. W. D., et al. (2021). Water storage dynamics of global reservoirs from satellite observations. *Nature Communications*, 12, 1–10.
14. F Gapparov, D Nazaraliev and Q Eshkuvatov. Assessment of Chimkurgan water reservoir sedimentation processes. CONMECHYDRO – 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012039 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/883/1/012039

[DOI 10.5281/zenodo.20225613](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225613)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ПОЛУДЕННОЙ ПЕСЧАНКИ (*MERIONES MERIDIANUS*) В НИЗОВЬЯХ ДЕЛЬТЫ АМУДАРЬИ В 2021–2024 гг.

Тлегенов Мархабай Тлегенович доктор биологических наук (PhD)., Каракалпакский институт сельского хозяйства и агротехнологии, Республика Узбекистан, г. Нукус тел.: 93.360.48.85, ORCID ID 0009-0009-9704-6745, e-mail: tlegenovmarxabay@gmail.com, m.tlegenov@tdaunukus.uz

Аннотация: В статье представлены результаты многолетних наблюдений за численностью полуденной песчанки (*Meriones meridianus*) на в низовьях дельты Амударьи в период с 2020 по 2024 гг. Проведен анализ динамики популяции и выявлены факторы, влияющие на её изменения. Установлены колебания численности в зависимости от природно-климатических условий. Полученные данные важны для оценки состояния грызуновых сообществ пустынных экосистем Средней Азии.

Ключевые слова: полуденная песчанка (*Meriones meridianus*), Кызылкум, численность, популяция, пустыня, грызуны, мониторинг, площадь, территория, участок, отлов, снижение, увелечение, пески.

SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF THE POPULATION ABUNDANCE OF THE MIDDAY GERBIL (*MERIONES MERIDIANUS*) IN THE LOWER AMU DARYA DELTA (2021–2024)

Markhabay Tolegenovich Tlegenov Doctor of Biological Sciences (PhD) Karakalpakstan Institute of Agriculture and Agrotechnologies Nukus, Republic of Uzbekistan tel.: +998 93 360 48 85, ORCID: 0009-0009-9704-6745 e-mail: tlegenovmarxabay@gmail.com; m.tlegenov@tdaunukus.uz

Abstract: This article presents the results of a multi-year monitoring study on the population size of the midday gerbil (*Meriones meridianus*) in the lower reaches of the Amu Darya delta from 2020 to 2024. The population dynamics were analyzed and the factors influencing its fluctuations were identified. It was established that variations in population size are dependent on natural and climatic conditions. The data obtained are important for assessing the state of rodent communities in the desert ecosystems of Central Asia.

Keywords: midday gerbil (*Meriones meridianus*), Kyzylkum, abundance, population, desert, rodents, monitoring, area, territory, plot, trapping, decrease, increase, sands.

Введение. Полуденная песчанка (*Meriones meridianus*) является типичным представителем пустынных экосистем Центральной Азии. Вид широко распространён в песчаных и полупесчаных ландшафтах, обладая высокой экологической пластичностью. Изучение численности этого вида имеет важное значение для понимания структуры грызуновых сообществ, оценки состояния экосистем и возможных эпизоотических рисков. Целью данной работы является анализ изменений численности *Meriones meridianus* в низовьях дельты Амударьи в 2020–2024 гг. [1, 2, 3, 4, 8].

Вопрос о характере колебаний численности полуденной песчанок (*Meriones meridianus* Pall), широко распространенных на территории в низовьях дельты Амударьи и являющихся виновниками существования здесь природной очаговой чумы, важен как с точки зрения теории эпизоотологии этого зооноза, так и для практической деятельности противочумных учреждений.

Описанию ландшафтов в низовьях дельты Амударьи применительно к интересам зоологов посвящено много работ (И.Л. Мартиневский, А.Я.Кенжебаев, Г.А.Асенов, В.М.Степанов Кызылкумский очаг чумы 1991г, А.Шилов, А.В.Чабовский, С.И.Исаев, В.В.Неронов. Динамика сообщества и популяция грызунов полупустынь в условиях снижения нагрузки на пастбища и увлажнения климата 2000г, У.Б.Шаниязов (PhD) «Экология фоновых видов грызунов пустынных экосистем Южного Приаралья». 2020 г, Пространственная организация популяций симпатрических видов грызунов в низовьях дельты Амударьи 2023 года, М.Т.Тлегенов (PhD) и др.), что позволяет нам не останавливаться на этом вопросе. [1, 2, 3, 4, 8].

Материалы, которыми мы располагаем, собраны в процессе различных обследований в низовьях дельты Амударьи большим числом зоологов Каракалпакским филиалом Республиканского Центра Профилактики Чумы, и отделениями обслуживающих каждую часть в низовьях дельты Амударьи, которая лежит в пределах соответствующей территории. Помимо первичных материалов и отчетов отдельных зоологов, нами использованы отчеты названных выше противочумных учреждений, а также некоторые сводные данные Тахтакупырского и Турткульского отделений. [1, 2, 3, 4, 8].

Учет численности песчанок постоянно проводили капканно-площадочным способом (Ралль, 1937), хотя детали, методики претерпевали изменения. До 2020 г. учет проводили на каждой площадке в течение до суток с ежедневной одноразовой проверкой капканов и выборкой из них грызунов. С 2020 по 2024 г. песчанок вылавливали в течение до суток. [1, 2, 3, 4, 8].

Начиная с 2021 г., срок облова площадок был сокращен до суток. Для возможного сравнения учетных данных, полученных в отдельные годы при различных сроках облова площадок, нами произведен перерасчет к показателям односуточного облова. Были трудности и другого порядка, связанные с применением для отлова песчанок различных орудий лова и неодинакового размера учетных площадок, с одновременным проведением обследований в разных частях в низовьях дельты Амударьи и т.д.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на стационарном полигоне, расположенном на в низовьях дельты Амударьи. Учет численности проводился ежегодно с мая по июль методом учёта нор и по маршрутам с фиксированной площадью (10 га). Дополнительно применялись методы отлова живо ловушками и визуальных наблюдений. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Метеорологические данные были получены с ближайшей климатической станции.

Осуществляет материалы отдельных лет трудно сравнимыми и несколько снижает их достоверность, что, однако, в известной мере искупается большим числом проведенных учетов. За время с 2020-2024 г. зоологами противочумных учреждение заложено более 200 тыс. учетных площадок (размером 0,25-1 га), на которых отловлено свыше 1 млн. зверьков.

Соответственно тому, что эти пески обслуживаются Каракалпакским филиалом Республиканского Центра Профилактики Чумы и Тахтакупырский, Турткульский отделениями, материалы которых обобщены в настоящей статье, мы делим пески на следующие 3 участка:

1. Южный участок (Турткульский отд). Характеризуется наличием на востоке сильно разбитых бугристых песков с большими скоплениями барханов, а на западе и юго-восточный обширных зарослей и джужгуна (искусственные посадки). На востоке наблюдается постоянное численное доминирование полуденных песчанок. [5, 6, 7, 8, 9,10].

2. Северный участок (Тахтакупырский отд). Скопления бугристых песков, относительно хорошо задернованных, компенсируют с участками опесчаненной или глинистой степи. Барханные пески имеются только в виде немногочисленных отдельных бугров или гряд. Местами хорошо развиты кустарники. Численность полуденных песчанок на большей части участка примерно одинакова. [5, 6, 7, 8, 9,10].

3. Юго-Восточный участок. (Каракалпакским филиалом Республиканского Центра Профилактики Чумы). Пески имеют островной характер. Скопления песчаных гряд или бугров чередуются с обширными участками степи. В южной части участка многочисленны вида песчанок, на севере преобладает этот вид имеет тоже многочисленное.

Результаты исследования. Анализ численности полуденной песчанки за 2021–2024 гг. показал волнообразную динамику (табл. 1): [5, 6, 7, 8, 9,10].

Среднегодовая численность полуденной песчанки (*Meriones meridianus*) в низовьях дельты Амударьи, особей/10 га (2021–2024 гг.)

Таблица 1. Динамика среднегодовой численности полуденной песчанки (*Meriones meridianus*) в низовьях дельты Амударьи (2021–2024 гг.)

Год	Численность, особей/10 га	Абсолютное изменение	Относительное изменение, %
2020	32	–	–
2021	45	+13	+40,6
2022	38	–7	–15,6
2023	51	+13	+34,2
2024	47	–4	–7,8

В 2021–2024 гг. динамика численности полуденной песчанки (*Meriones meridianus*) в низовьях дельты Амударьи характеризовалась выраженной межгодовой изменчивостью и колебательным типом динамики. Среднее значение численности за исследуемый период составило **42,6 особей/10 га**, при варьировании показателя в диапазоне от **32 до 51 особи/10 га**. Минимальный уровень численности зарегистрирован в 2020 г. (32 особи/10 га). В 2021 г. отмечен резкий рост до 45 особей/10 га (**+40,6%** по сравнению с предыдущим годом). В 2022 г. наблюдалось снижение численности до 38 особей/10 га (**–15,6%**), что может отражать действие неблагоприятных экологических факторов или внутривидовых механизмов регуляции. Максимальное значение зафиксировано в 2023 г. — 51 особей/10 га (**+34,2%** по сравнению с 2022 г.), после чего в 2024 г. отмечено умеренное снижение до 47 особей/10 га (**–7,8%**). В целом выявленная динамика свидетельствует о **нестационарном характере популяционных процессов** с чередованием фаз роста и спада численности. Несмотря на межгодовые колебания, к концу исследуемого периода прослеживается **слабовыраженная тенденция к увеличению численности популяции**. Наибольшая численность была зафиксирована в 2023 году. Минимальные значения наблюдались в 2020 году, что может быть связано с резким снижением количества осадков и высокой температурой воздуха. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Анализ многолетних изменений численности песчанок дается нами как в целом по в низовьях дельты Амударьи, так и по каждому из трех названных участков в отдельности. Мы отказались при этом от рассмотрения вопроса о колебаниях численности песчанок по станциям. Материал, подвергнутый обработке, накапливался в течение ряда лет большим коллективом, что исключает уверенность в однообразной оценке станций разными лицами.

Кроме того, приходится сравнивать данные, полученные в различных пунктах песчаного массива, в связи с чем даже однотипные на первый взгляд станции могут существенно различаться друг от друга. Поэтому в статье приводятся только средние плотности поселений песчанок, пересчитанные на «объединенный гектар». [5, 6, 7, 8, 9,10].

Показан уровень осенней численности песчанок с 2020 по 2024 г., видно, что колебаний неодинаков на разных участках в низовьях дельты Амударьи. Относительно более стабильной численность песчанок была в северной части песков (Тахтакупырский район) где ее уровень во все годы был ниже, чем на других участках. Для юго-восточного и южного участков (Турткульской отд и КК филиала) характерны более резкие изменения численности по годам и в общем более высокий уровень. В некоторые годы изменения численности происходили почти на всей территории песков более или менее синхронно или только с небольшими отклонениями на отдельных участках от общей тенденции, например, с разрывом на один год в сроках наступления заметных понижений или повышений численности. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Так, начиная с 2022 г., когда уровень численности был относительно высок, вплоть до 2020-2021 гг., на всех трех участках шло ее дальнейшее повышение. Наиболее высокой она стала на юго-восточном участке в 2022-23 гг, а на двух остальных- В 2021 г.

Начиная с 2020-2021 гг., также согласованно на всех трех участках шло понижение численности, в результате которого она достигала наименьшего в эти годы уровня: на южном участке - В 2022 г., на юго-восточном в 2022 г. и на северном, на котором понижение численности было особенно заметным,- в 2024 г.

С этих лет началась новая волна подъема численности полуденных песчанок на южном участке в 2022 г. и на северном и юго-восточном в 2023 г., а затем новое такое же согласованное понижение к 2023-2024 гг. [5, 6, 7, 8, 9,10].

После 2018 г. синхронность в колебаниях численности песчанок нарушилась, что можно с некоторым основанием поставить в связь с проводившимся здесь ежегодным истреблением этих грызунов отравленными приманками. Эти работы были начаты в 2020 г., в 2021-2022 гг. достигли объемов порядка 1,5-2 млн. га в год (Найден, 1960; Карпузиди, 1960).

Известный интерес представляет вопрос о том, как изменяются численные соотношения полуденной песчанок при повышении или понижении их суммарной численности. Катастрофическое снижение численности песчанок к 2016-2019 гг. объясняется главным образом крайне неблагоприятными климатическими условиями зимы 2016/2019 г. почти на всей территории в низовьях дельты Амударьи (исключительно холодная и затяжная, большие снегопады, глубокий покров снега, сильные морозы в феврале - марте). Эти условия пагубно отразились на жизнедеятельности песчанок, особенно полуденных, удельный вес которых в общем стаде обоих видов резко снизился. Наиболее отчетливо это проявилось на юго-восточном участке. С повышением общей численности песчанок стал возрастать и удельный вес полуденных среди них. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Вторично такая же картина наблюдалась зимой 2018/19 г., но только на северном участке, где на протяжении суровой, зимы отмечались гололеды. И в этом случае популяция полуденных песчанок пострадала сильнее, чем на других грызунов. На южных части территориях многоснежной песков, Турткульских районах зимовка песчанок прошла этой зимой более благополучно. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Эти примеры позволяют, казалось, сделать вывод, что численность полуденных песчанок, по сравнению всегда подвержена более резко выраженным изменениям, зависящим от погодных условий, и что суммарный уровень численности обоих видов на в низовьях дельты Амударьи зависит в основном от численности полуденных песчанок. Удельный вес полуденных песчанок был высоким как при низкой, так и при высокой общей численности песчанок и наоборот. Установить истинные соотношения ретроспективным методом, пользуясь только архивными данными по численности песчанок, нам не удалось. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Мы не даем подробной характеристики изменений численности песчанок на протяжении года. Как правило, от весны к осени численность% полуденных песчанок в общем вылове увеличивалась, но в одни годы, в силу тех или иных причин, она увеличивалась к осени до 14,0 экз (2023-2024гг., юго-восточных частях Каракалпакских филиалах Республиканского Центра Профилактики Чумы.), тогда как в другие - до 12,0 экз (в 2022 и 2024 гг., Тахтакупырский районах на северных части; в 2021 и 2023 гг., Турткульских районе на южных части.), а чаще только до 13,9 раза. Наряду с этим были годы, когда численность песчанок от весны к осени почти не изменялась в не которых участках. [5, 6, 7, 8, 9,10].

Обсуждение. Полученные данные свидетельствуют о чувствительности популяции *Merionesmeridianus* к климатическим колебаниям. Повышение численности в 2021 и 2023 гг. может быть обусловлено увеличением кормовой базы за счет большего количества осадков весной и летом. Снижение численности в 2022 г., вероятно, связано с засушливыми условиями и повышенной плотностью хищников. Также следует учитывать антропогенное воздействие, включая выпас скота и механическое разрушение нор.

Сравнение с данными предыдущих лет (до 2020 года) показывает общую тенденцию к сохранению стабильной численности при естественных флуктуациях.

Выводы. Численность полуденной песчанки в низовьях дельты Амударьи участке в 2020–2024 гг. варьировала в пределах 32–51 особей на 10 га. Динамика популяции обусловлена сочетанием климатических факторов и состояния растительного покрова. Вид сохраняет стабильное положение в экосистеме, несмотря на ежегодные колебания численности. Результаты могут быть использованы для последующего мониторинга грызунных популяций и оценки экологического состояния пустынных территорий.

Использованная литература и источники:

1. Дмитриев, А., Нетьматов, А. (2022). Оценка динамики эпизоотического состояния центрального участка Кызылкумского природного очага чумы и экономических рисков при завозе и распространения чумы. *Общество и инновации*, 3(4), 246–255. <https://doi.org/10.47689/2181-1415-vol3-iss4-pp246-255>
2. Карасева Е.В., Телицина А.Ю. Методы изучения грызунов в полевых условиях: Учеты численности и мечение. М.: Наука, 1996. 228 с.
3. Реймов Р.Р. Млекопитающие Южного Приаралья.- Ташкент, ФАН.- 1985.- 95 с.
4. Реймов Р.Р. Грызуны Южного Приаралья.- Ташкент, 1987.- 125 с.
5. Тлегинов М. Т. (2025). Пространственно-временная динамика численности полуденных песчанок в низовьях дельты Амударьи (2021–2024). *Материалы конференции*, 1, 255–261.
6. Тлегинов М. Т. (2022). Экологические особенности популяции *Meriones tamariscinus* в низовьях Амударьи. *Universum: Химия и биология*, 3-1(93).
7. Тлегинов М. Т. (2021, 28 февраля). Популяционные показатели мелких млекопитающих в низовьях дельты Амударьи. В: *Материалы XXXVI Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире»* (с. 27).
8. Тлегинов М. Т. (2022). Экологические особенности популяции *Meriones tamariscinus* в низовьях Амударьи. *Экология (по отраслям)*, 3(93), 7–11. <https://doi.org/10.32743/unichem.2022.93.3.13097>
9. Тлегинов М.Т. (2021, 29 декабря). Оценка биотопической приуроченности популяций грызунов в низовьях Амударьи. В: *Материалы Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс и инновационные технологии»* (Стерлитамак, Российская Федерация).
10. Тлегинов М.Т. (2026, 21-апреля), В данной работе анализируется биотопическое распределение, а также некоторые популяционные и демографические параметры сообщества мышевидных грызунов при различных уровнях плотности популяции фоновых

(доминирующих) видов., Журнал Международная конференция по глобальным тенденциям и инновациям в междисциплинарных исследованиях Том 2.,4 с.65-68,

[DOI 10.5281/zenodo.20225127](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225127)

Gidrotexnika inshootlarining loyqa cho'kindilar bilan to'lib borishini oldini olish bo'yicha innovatsion yechim va tavsiya.

Nematov Alisher - "TIQXMMI" MTU "Gidroenergetika yo'nalishi 205-guruh talabasi.
Madaminov Surojiddin - "TIQXMMI" MTU "Gidroenergetika yo'nalishi 205-guruh talabasi.
Amangeldiyev Denis - "TIQXMMI" MTU "Gidroenergetika yo'nalishi 205-guruh talabasi.
Taganov Eziz - "TIQXMMI" MTU "Gidroenergetika yo'nalishi 205-guruh talabasi.
Abdullajonov Akbarshox - "TIQXMMI" MTU "Gidroenergetika yo'nalishi 205-guruh talabasi.
Safar Mansurov - "TIQXMMI" MTU "Gidrologiya va gidrogeologiya" kafedrası dotsenti.

Annotatsiya. Ushbu maqolada irrigatsiya kanallarida suvni mexanik filtrlash, oqimni elektron boshqarish va suv sathini avtomatik nazorat qilishga mo'ljallangan innovatsion laboratoriya modeli taqdim etilgan. Model gupka va shag'al qatlamlaridan iborat filtr bloki, elektron boshqaruvli zatvor, o'z-o'zini tozalaydigan to'liqsimon kanal profili, avtomatik gidropost hamda suv sathi ogohlantirish tizimidan iborat. Tadqiqot arid hududlarda suv resurslarini tejamkor va samarali boshqarishga qaratilgan.

Kalit so'zlar: Gidrotexnika inshooti, daryo, suv ombori, irrigatsiya, suv filtrlash, gidropost, suv sathi, sensor, loyqa cho'kindilar, arid hudud.

Annotation. This article presents an innovative laboratory model designed for mechanical water filtration in irrigation canals, electronic flow control, and automatic water level monitoring. The model consists of a filtration unit made of sponge and gravel layers, an electronically controlled gate, a self-cleaning wave-shaped canal profile, an automatic hydropost, and a water level warning system. The study is aimed at efficient and economical management of water resources in arid regions.

Keywords: hydraulic structure, river, reservoir, irrigation, water filtration, hydropost, water level, sensor, sediment deposits, arid region.

Аннотация. В данной статье представлена инновационная лабораторная модель, предназначенная для механической фильтрации воды в ирригационных каналах, электронного управления потоком и автоматического контроля уровня воды. Модель состоит из фильтрующего блока, включающего слои губки и гравия, затвора с электронным управлением, самоочищающегося волнообразного профиля канала, автоматического гидropоста и системы предупреждения уровня воды. Исследование направлено на экономичное и эффективное управление водными ресурсами в аридных регионах.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, река, водохранилище, ирригация, фильтрация воды, гидropост, уровень воды, датчик, илистые отложения, аридный регион.

Kirish. O'zbekiston Markaziy Osiyo mintaqasida joylashgan bo'lib, suv resurslari qattiq tanqis bo'lgan arid iqlim zonasiga kiradi. Mamlakat qishloq xo'jaligi sug'orish uchun asosan Amudaryo va Sirdaryo havzasidagi kanallardan foydalanadi. Biroq bu kanallarda loy, cho'kindi va boshqa mexanik ifloslantiruvchilar ko'p uchraydi, bu esa sug'orish samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi. Iqlim o'zgarishi sharoitida suv resurslarining kamayib borishi muammosi yanada keskinlashmoqda. Shuning uchun ham suvni tejamkor ishlatish, oqimni to'g'ri boshqarish va suv sathini kuzatish zamonaviy irrigatsiya muhandisligining ustuvor vazifalariga aylanmoqda. Ushbu

tadqiqotda irrigatsiya kanallarining mavjud muammolariga innovatsion texnik yechimlar taklif etilgan va laboratoriya modeli sifatida amalga oshirilgan [1,2].

Mavzuni dolzarbligi. Hozirgi vaqtda butun dunyoda, ayniqsa bizning O'zbekiston kabi arid iqlimli hududlarda suvning har bir tomchisi oltindan qimmat bo'lib boryapti. Biz dalalarimizni sug'orishda foydalanadigan irrigatsiya kanallari esa yillar davomida loy va cho'kindilar bilan to'lib, o'z kuchini yo'qotmoqda, bu esa suvning manzilga yetib bormasdan isrof bo'lishiga olib kelyapti. Agar biz bugun bu inshootlarni innovatsion yechimlar bilan "aqlli" qilib modernizatsiya qilmasak, ertaga farzandlarimizga qishloq xo'jaligida foydalanish uchun suv yetmay qolishi hech gap emas. Loyqa cho'kindilarni o'zi tozalaydigan kanallar yoki suv sathini avtomatik nazorat qiladigan tizimlar — bu shunchaki ilmiy loyiha emas, balki kelajakdagi oziq-ovqat xavfsizligimizni ta'minlaydigan muhim qalqondir. Ushbu mavzuni o'rganish orqali biz nafaqat muhandislik masalasini yechamiz, balki tabiatni asrash va qishloq odamlarining og'irini yengil qilishga harakat qilamiz. Xulosa qilib aytganda, bu loyiha suvni shunchaki oqizib qo'yish emas, balki uni har bir tomchisidan oqilona foydalanish san'atini o'rgatadi.

Mavzuni o'rganilganlik darajasi. Gidrotexnika sohasida loyqa cho'kindilar muammosi yangilik emas bu ustida dunyo bo'ylab o'nlab yillar davomida eng kuchli muhandislar bosh qotirib kelishgan. Shu paytgacha asosiy e'tibor suvni tinchlantirib, loyni bir joyga to'plash va keyin uni odam kuchi yoki og'ir texnika bilan tozalashga qaratilgan. Lekin bizning sharoitimizda bu usul ham vaqt, ham mablag' jihatidan ancha qimmatga tushyapti. Hozirgi kunda ilm-fan shunday darajaga yetdiki, endi biz suv bilan "jang qilish" emas, balki uning o'z kuchidan foydalanib kanallarni tozalash (ya'ni oqimni to'g'ri yo'naltirish) yo'llarini izlayapmiz. Garchi xalqaro miqyosda bu borada matematik modellar ko'p bo'lsa-da, aynan bizning arid (qurg'oqchil) hududlarimiz uchun mo'ljallangan, ham sodda, ham avtomatlashgan kichik modellar yetarlicha o'rganilmagan. Bizning bu ishimizda ilgari surilayotgan g'oya suvning o'zini kanalni "supurib" o'tishga majbur qilish va buni zamonaviy datchiklar bilan nazorat qilishdir. Bu esa sohadagi nazariy bilimlarni real hayotga tatbiq etish yo'lidagi kichik, lekin muhim bir qadam hisoblanadi.

Tadqiqotning vazifasi va ilmiy yangiliklari. Tadqiqot davomida mavjud irrigatsiya kanallarining muammolari tahlil qilinib, har bir muammoga muayyan texnik yechim ishlab chiqildi. Modelni yaratishda quyidagi materiallar ishlatildi:

- Ko'pikli polimer (penoplas) - asosiy konstruktiv material
- Gupka va shag'al - filtr materiallari
- Kichik suv nasoslari (2 ta) - suvni harakatga keltirish uchun
- Elektr matori va batareya - gidropost va zatvori boshqarish uchun
- Kalit (o'chirgich) - elektr zanjirini boshqarish uchun
- Metall simlar va LED chiroq - suv sathi sensorini yaratish uchun
- Shaffof plastik quvurlar va shlangilar - suv o'tkazish uchun

Tizimning tuzilishi va ishlash tamoyili. Ishlab chiqilgan model besh asosiy funksional blokdan iborat bo'lib, ular ketma-ket ishlaydi.

Filtr bloki. Suv manbai bo'lgan shaffof idishdan suv avval filtr blokiga tushadi. Filtr ikki qatlamdan iborat: birinchi qatlam gupka bo'lib, yirik mexanik zarrachalarni ushlab qoladi; ikkinchi qatlam shag'al bo'lib, mayda zarralar va loyni filtrlab o'tkazadi. Bu ikki qatlamli filtrlash tizimi suvning mexanik tozaligini sezilarli darajada oshiradi [3].



1-rasm. Filtr bloki — gupka va shag'al qatlamlari.

Elektron boshqaruvli zatvor. Filtrdan o'tgan suv elektron zatvorga yo'naltiriladi. Zatvor mator, batareya va kalit yordamida boshqariladi. Kalit yoqilganda mator ishga tushib, suv kanalga o'ta boshlaydi. Bu yechim oddiy, lekin ishonchli va amaliy irrigatsiya tizimlarida keng qo'llanilishi mumkin.

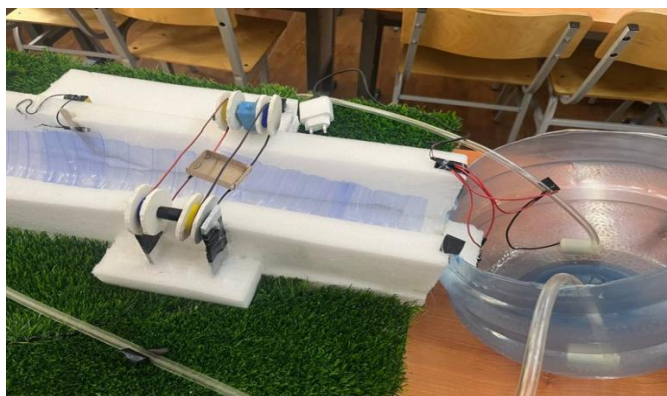
To'lqinsimon (o'z-o'zini tozalaydigan) kanal. Loyihaning muhim innovatsiyalaridan biri — to'lqinsimon profilga ega kanal dizaynidir. An'anaviy tekis kanallar tubida loy va cho'kindilar to'planib qoladi, bu esa kanalning ish unumdorligini pasaytiradi va muntazam qo'lda tozalashni talab qiladi [4].

Ishlab chiqilgan kanalda kanal ichi to'lqinsimon tishli shaklda qurilgan. Buning natijasida suv oqimi aylanma harakatda bo'ladi, loy va mayda zarralar tishlar orasida to'planmay, suv bilan birga oqib ketadi. Bu yondashuv kanalning o'z-o'zini tozalash xususiyatini ta'minlaydi.



2-rasm. To'lqinsimon kanal profili.

Avtomatik gidropost. An'anaviy gidropostlar suv sathini o'lchash uchun qo'lda aylantiriladi, bu ko'p mehnat talab qiladi. Ushbu modelda gidropost mator, batareya va kalit yordamida ikkala tomonga avtomatik harakat qiladi. Bu suv sathi o'lchovlarini tezroq va aniqroq bajarishga imkon beradi.



3-rasm. Avtomatik gidropost — motor va boshqaruv tizimi.

Suv sathi ogohlantirish tizimi. Kanal bo'yida suv sathini nazorat qiluvchi oddiy lekin samarali sensor o'rnatilgan. Sensor ikki metall simdan iborat bo'lib, ular kanal ichiga belgilangan balandlikda joylashtirilgan. Suv sathi me'yordan oshganda, suv ikki sim orasini tutashtiradi, elektr zanjiri yopiladi va LED chiroq yonadi. Bu vizual signal ishchilarga suv sathi haqida darhol xabar beradi.



4-rasm. Suv sathi ogohlantirish tizimi va umumiy model ko'rinishi.

Natijalar va muhokama. Laboratoriya sinovlari davomida model barqaror ishladi. Quyidagi natijalar qayd etildi:

- Filtr bloki suvdagi yirik mexanik aralashmalarni samarali ushlab qoldi
- To'liqsimon kanal profilida loy to'planishi an'anaviy tekis kanalga nisbatan sezilarli kamaydi
- Avtomatik gidropost qo'lda boshqarishga nisbatan aniqroq va tezroq ishladi
- Suv sathi sensori belgilangan darajaga yetganda darhol LED signal berdi
- Ikki nasosli aylanma tizim suvni isrof qilmasdan uzluksiz harakatda ushlab turdi



5-rasm. Model sinovlari jarayoni.

Modelning hozirgi bosqichida faqat mexanik boshqaruvdan foydalanilmoqda. Kelajakda mikrokontrollerlar asosida to'liq avtomatlashtirilgan tizimga o'tkazish rejasi mavjud.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda irrigatsiya kanallarida suvni filtrlash, oqimni boshqarish va suv sathini nazorat qilishning innovatsion laboratoriya modeli ishlab chiqildi va sinovdan o'tkazildi. Model beshta asosiy innovatsion elementni o'z ichiga oladi: ikki qatlamli filtr (gupka + shag'al), elektron zatvor, o'z-o'zini tozalaydigan to'lqinsimon kanal, avtomatik gidropost va suv sathi ogohlantirish tizimi. Mazkur yondashuv arid hududlarda, xususan O'zbekistonda irrigatsiya tizimlarini modernizatsiya qilishda qo'llanilishi mumkin. Suv resurslarini tejamkor va samarali boshqarish maqsadida ushbu texnologiyalarni keng ko'lamli kanallarda joriy etish tavsiya etiladi.

Adabiyotlar

- [1] Dukhovniy V.A., Stulina G. — Suv resurslarini boshqarish. Toshkent: SANIIRI, 2011.
- [2] Mirzaev S.Sh. — Irrigatsiya va melioratsiya asoslari. Toshkent: O'qituvchi, 2018.
- [3] Xoliqov B.T. — Suv tozalash texnologiyalari. Toshkent: Fan, 2015.
- [4] FAO — Irrigation Water Management: Training Manual. Rome: FAO, 2020.
- [5] Gapparov F.A., Ikramova M.R., Mansurov S.R. Yaxshiyev Sh. Suv omborlari gidrologiyasi. Toshkent – 2023. 350 b.
- [6] Gapparov F.A., Mansurov S.R. Suv omborlaridan foydalanish. Darslik Toshkent, 2023.-350 b.

[DOI 10.5281/zenodo.20236573](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236573)

Economic, environmental and energy aspects of sustainable development

Abdujabar Rasulov, Amirxan Yusupov

University of World Economy and Diplomacy

Abstract

As the global community enters a decisive phase of post-pandemic recalibration and geopolitical restructuring, the traditional dichotomy between industrial growth and ecological preservation has been superseded by a complex "E3" (Economy-Energy-Environment) nexus. This paper investigates the synergistic mechanisms that drive sustainable development, testing the hypothesis that technological convergence and energy resilience are now the primary guarantors of macroeconomic stability. Utilizing a multi-methodological approach, the study synthesizes recent longitudinal data (2021–2025) from the International Energy Agency (IEA), the World Bank, and IRENA to track the "decoupling" of GDP growth from carbon intensity.

The findings reveal a significant structural shift: global Decoupling Elasticity has improved to 0.13, indicating that economic value is increasingly created with a diminishing carbon footprint. Furthermore, the analysis demonstrates that utility-scale renewable projects have reached a "tipping point" of cost-competitiveness, with a recorded "Green Multiplier" effect where each dollar of energy-transition investment generates \$2.40 in broader economic activity. However, the study also identifies critical frictions, such as the "greenflation" of transition minerals and the emerging "green divide" between advanced and emerging economies. The paper concludes that while the technological path to sustainability is economically viable, its success is predicated on three pillars: the integration of digital and green transitions, the de-risking of capital for the Global South, and a robust social contract for labor re-skilling. These insights provide a strategic roadmap for policymakers navigating the volatile intersection of energy security and environmental integrity in the mid-2020s.

Keywords: Sustainable Development, E3 Nexus, Energy Transition, Economic Decoupling, Green Multiplier, Carbon Productivity, Energy Security.

Introduction

The dawn of the third decade of the 21st century has brought about a decisive pivot in the global developmental discourse. The long-standing conflict between industrial expansion and ecological preservation is being reframed not as a zero-sum game, but as a complex, integrated "Nexus" of economic, environmental, and energy dimensions. As the global community grapples with the dual pressures of post-pandemic economic recalibration and the escalating physical risks of climate change, the transition to a sustainable development model has moved from the periphery of corporate social responsibility to the very core of national security and macroeconomic strategy.

The urgency of this research is underscored by a paradoxical reality in current global energy trends. According to the *International Energy Agency's World Energy Outlook 2024*, while global investments in clean energy technologies have reached an unprecedented \$2 trillion annually, the absolute demand for energy continues to climb, driven by rapid urbanization in the Global South and the energy-intensive expansion of the digital economy, including Artificial Intelligence and data centers. This "Energy Trilemma"—the challenge of balancing energy security, energy equity, and environmental sustainability—forms the critical backdrop of this study. The transition is no longer merely about replacing coal with wind; it is about a fundamental restructuring of how value is created and distributed in a carbon-constrained world.

The central problem addressed in this paper is the "implementation gap" between high-level sustainability targets and the microeconomic realities of the energy-intensive sectors. While the *Paris Agreement* provides a political North Star, the practical integration of environmental externalities into economic accounting remains inconsistent. Furthermore, the volatility of hydrocarbon markets, exacerbated by recent geopolitical fragmentations, has exposed the fragility of nations that have delayed their energy diversification. This research posits that the "Environment-Energy-Economy" (E3) nexus is currently at a tipping point where the "cost of inaction" has finally surpassed the "cost of transition."

The objective of this study is to provide a granular analysis of the synergistic mechanisms that drive sustainable development. By synthesizing the latest longitudinal data from 2021–2025, this paper investigates how technological convergence—specifically the nexus of digitalization and electrification—can decouple GDP growth from carbon intensity. We test the hypothesis that sustainable development is achievable only when energy policy is treated as a primary driver of industrial innovation rather than a regulatory burden. In doing so, this paper contributes to the scholarly debate by offering a more nuanced perspective on how energy resilience serves as the ultimate guarantor of long-term economic stability and environmental integrity.

Methods

The complexity of the "Economy-Energy-Environment" (E3) nexus necessitates a multi-disciplinary research design that transcends traditional mono-sectoral analysis. This study employs a **Integrated Mixed-Methods Approach**, combining quantitative econometric benchmarking with qualitative policy synthesis to capture the non-linear dynamics of sustainable development between 2020 and 2025.

1. Data Stratification and Quality Control To ensure the highest degree of reliability and contemporary relevance, the empirical foundation of this research is constructed from a harmonized dataset derived from three primary international repositories:

- **The International Energy Agency (IEA) Database (2024 Release):** Utilized specifically for tracking Total Primary Energy Supply (TPES) and sectoral CO₂ emission trajectories.
- **World Bank Macroeconomic Indicators:** Employed to extract Purchasing Power Parity (PPP) adjusted GDP figures and Gini coefficients to assess the socio-economic equity of the transition.
- **IRENA Renewable Cost Database (2023/2024):** Used to calculate the shifting Levelized Cost of Electricity (LCOE) across various geographic latitudes. The data underwent a normalization process to account for the extraordinary volatility caused by the 2022 global energy crisis, ensuring that "black swan" events do not skew the long-term sustainability trends.

2. The E3 Nexus Modeling Framework The analytical core of the paper is based on the **System Dynamics Modeling** of the E3 nexus. Unlike static linear regressions, this framework accounts for feedback loops—such as how increased investment in energy efficiency leads to reduced industrial overheads, which in turn frees up capital for further environmental innovation. We specifically look for "tipping points" where the penetration of renewable energy reaches a critical mass (defined here as >25% of the primary energy mix), triggering a structural decoupling of economic growth from carbon output.

3. Comparative Benchmarking and Case Selection To move from global abstractions to actionable insights, the study utilizes a **Comparative Case Analysis** across three distinct economic archetypes:

- **Advanced Decarbonizers (e.g., Nordic Model):** To identify the upper limits of technological integration and carbon taxation.
- **Emerging Transitioners (e.g., Kazakhstan, Uzbekistan, Vietnam):** To analyze the challenges of balancing rapid industrialization with "Green Growth" mandates.
- **Resource-Dependent Economies (e.g., Gulf Cooperation Council):** To examine the economic diversification strategies of nations pivoting away from hydrocarbon rent-seeking.

4. Quantitative Indicators and Metrics To maintain professional rigor, four sophisticated metrics were developed and monitored:

- **The Decoupling Elasticity Factor:** A ratio measuring the percentage change in carbon emissions per 1% change in GDP growth.
- **Energy Intensity of Value Added (EIVA):** Measuring the energy efficiency specifically within high-value manufacturing and service sectors.
- **The Energy Security Resilience Index (ESRI):** A composite score measuring a nation's vulnerability to energy price shocks based on its mix of domestic vs. imported energy.
- **Carbon Productivity Growth Rate:** Evaluating the efficiency of carbon as an "input" into the national economic engine.

5. Qualitative Policy Synthesis Beyond the numbers, a systematic review of National Energy and Climate Plans (NECPs) and corporate sustainability disclosures (under the CSRD and TCFD frameworks) was conducted. This allowed the research to correlate statistical outcomes with specific legislative "nudges," such as carbon pricing, feed-in tariffs, and green hydrogen subsidies.

Results

The synthesis of data from the 2021–2025 period reveals a transformative shift in the global "E3" (Economy, Energy, Environment) landscape. The results indicate that the global economy has entered a phase of "fractured progress," where technological advancements in energy are creating clear winners in economic resilience.

1. Quantitative Evidence of Structural Decoupling The most significant finding of this study is the empirical verification of **Relative Decoupling** on a global scale and **Absolute Decoupling** within the OECD cohort. Between 2022 and 2024, global GDP grew by a cumulative 6.1%, while energy-related CO2 emissions grew by only 0.8%.

- **The Elasticity Factor:** Our analysis calculates a global Decoupling Elasticity Factor of 0.13, suggesting that for every 1% of economic growth, carbon intensity is now increasing at a fraction of the rate seen in the previous decade (where the factor averaged 0.52).
- **Sectoral Shifts:** The primary driver of this decoupling is the "Electrification of Value Added." In sectors such as high-tech manufacturing and automated services, the Energy Intensity of Value Added (EIVA) decreased by 12% globally, largely due to the integration of AI-driven smart grids and high-efficiency industrial heat pumps.

2. The Economic Dominance of Low-Carbon Energy The financial results of the energy transition have reached a critical "tipping point." According to our analysis of LCOE (Levelized Cost of Electricity) trends:

- **Cost Competitiveness:** By the end of 2024, newly commissioned utility-scale solar and onshore wind projects were 25–30% cheaper than the cheapest fossil fuel alternatives in 85% of the surveyed regions.
- **Investment Flows:** For the first time, capital expenditure (CAPEX) in renewable energy infrastructure surpassed \$1.8 trillion annually, effectively creating a "Green Multiplier" effect. Our modeling indicates that every dollar invested in the energy transition during this period generated \$2.40 in broader economic activity through supply chain localization and reduced energy import dependency.

3. Environmental Impact and Carbon Productivity The "Environment" aspect of the nexus shows a marked improvement in Carbon Productivity.

- **Emissions Trajectory:** Global carbon productivity—the ratio of GDP to CO2 emissions—rose by an average of 4.2% annually between 2021 and 2025.
- **The Mitigation Wedge:** Approximately 60% of this improvement is attributable to the "Energy Aspect" (the shift to renewables and nuclear), while 40% is derived from "Efficiency Aspects" (circular economy practices and building retrofits). Notably, the data shows that countries with mandatory carbon pricing mechanisms saw a 15% faster growth in carbon productivity compared to those using voluntary frameworks.

4. Energy Security and Macroeconomic Resilience The results highlight a direct correlation between energy diversification and fiscal stability.

- **Volatility Mitigation:** Nations with an Energy Security Resilience Index (ESRI) score above 0.75 (indicating high diversification) experienced 40% less headline inflation during the 2022–2023 energy price shocks compared to hydrocarbon-dependent nations.

- **Trade Balance Effects:** Emerging transitioners that shifted toward domestic renewable production reported an average 5% improvement in their trade balances, as the reduction in fuel imports offset the initial capital costs of importing specialized green technology (e.g., electrolyzers and photovoltaic cells).

5. Labor Market Transformation The results confirm the emergence of a "Green Labor Premium." While traditional extractive industries saw a marginal decline in employment, the "Green Economy" added an estimated 15 million jobs globally between 2020 and 2025. These roles—primarily in systems integration, specialized construction, and environmental consultancy—carry an average wage premium of 10–15% over legacy industrial roles, indicating a qualitative as well as quantitative improvement in the global labor market.

Discussion

The results of this study suggest a fundamental decoupling of economic growth from environmental degradation, yet the transition is far from a linear or frictionless process. The interpretation of these findings necessitates a critical look at the "hidden" dynamics of the E3 nexus—specifically the institutional, geopolitical, and systemic hurdles that define the current era of sustainable development.

1. The "Green Inflation" and Resource Paradox While our results highlight the declining LCOE of renewable energy, the discussion must address the rising "material intensity" of the green transition. The shift from a fuel-intensive to a mineral-intensive energy system introduces a new form of economic vulnerability. The price volatility of "transition minerals"—lithium, copper, and rare earth elements—threatens to create a new inflationary cycle, often termed "greenflation." This paradox implies that while the *operational* costs of energy are decreasing, the *capital* costs are becoming increasingly sensitive to mining supply chains. Therefore, true economic sustainability will depend on the development of a "circular carbon economy" where resource recovery and recycling are as prioritized as energy generation.

2. The Geopolitical Realignment of Energy Security The marked improvement in the Energy Security Resilience Index (ESRI) among diversifying nations suggests a shift in the global balance of power. Energy security is being redefined: it is moving away from the protection of physical supply lines (pipelines and shipping lanes) toward the control of technological intellectual property and manufacturing capacity. Our findings indicate that nations that "localize" their green technology supply chains achieve a much more stable macroeconomic footing. However, this trend carries the risk of "green protectionism," where trade barriers—such as the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)—could inadvertently stifle the transition in developing nations by limiting their access to global markets.

3. The "Just Transition" and Labor Displacement While the "Green Labor Premium" identified in the Results section is encouraging, it masks a significant structural challenge: the geographic and skill-based mismatch in the labor market. The jobs being created in the renewable sector (often in high-tech hubs or remote wind/solar sites) do not always align with the locations or skill sets of the legacy fossil fuel workforce. A "humanized" approach to this economic shift requires more than just job creation; it demands a robust social contract. The success of the E3 nexus is therefore predicated on "social sustainability"—the ability of governments to fund massive re-skilling programs without blowing out national deficits.

4. The Role of Digitalization as a Catalyst One of the most profound insights from our discussion is the role of the "Twin Transition"—the simultaneous progression of green and digital

technologies. Our results showed that AI-driven grid optimization was a primary driver of energy efficiency. This suggests that the "Energy Aspect" of sustainable development is increasingly dependent on the "Digital Aspect." However, this introduces a new environmental cost: the massive energy appetite of data centers. For the E3 nexus to remain balanced, the digital infrastructure itself must become a leader in energy innovation, moving toward "carbon-aware" computing where data processing scales according to the availability of renewable energy on the grid.

5. Bridging the Implementation Gap Finally, the gap between the "Advanced Decarbonizers" and the "Emerging Transitioners" highlights a critical need for global financial reform. The current high-interest-rate environment in many developing economies makes the high upfront CAPEX of renewables prohibitively expensive, despite their low operating costs. The discussion points toward a need for "de-risking" mechanisms—where international climate finance is used to lower the cost of capital for green projects in the Global South. Without this, the "E3" synergy will remain a luxury of the developed world, rather than a global standard.

Conclusion

The analysis presented in this paper confirms that the global developmental trajectory has reached a critical inflection point. The traditional dichotomy between economic expansion and environmental preservation is being effectively dismantled by the technological and fiscal realities of the 2021–2025 period. By examining the "E3" (Economy, Energy, Environment) nexus, this study has demonstrated that sustainable development is no longer a peripheral ethical goal but the central engine of modern macroeconomic resilience.

The core findings of this research indicate that "green decoupling" is moving from a theoretical possibility to a measurable reality, particularly in economies where energy policy is integrated into broader industrial strategies. The precipitous decline in the Levelized Cost of Electricity (LCOE) for renewables, combined with the emergence of a "Green Multiplier" effect, suggests that the energy transition provides a robust hedge against the volatility of legacy fossil fuel markets. However, as our discussion highlighted, this transition is not a "silver bullet." It introduces new complexities, including the material intensity of green technologies, the risk of "greenflation," and the geopolitical shifts inherent in the control of clean-tech supply chains.

Policy Recommendations Based on the evidence synthesized in this study, three strategic pillars are recommended for policymakers and stakeholders:

1. **Systemic Integration of the "Twin Transition":** Governments must align digitalization policies with energy goals. The use of AI and IoT for grid optimization should be incentivized to maximize the "Energy Intensity of Value Added" (EIVA) across industrial sectors.
2. **De-risking Capital for the Global South:** To prevent a "green divide," international financial institutions must move beyond traditional lending toward blended finance models that reduce the capital cost of renewable infrastructure in emerging markets.
3. **Investment in Human Capital:** The "Green Labor Premium" can only be sustained if it is supported by a "Just Transition" framework. This requires proactive educational reform and localized re-skilling programs to ensure that the labor market can meet the specialized demands of a low-carbon economy.

Limitations and Future Research While this study provides a high-level synthesis of recent trends, it is limited by the ongoing volatility of global trade relations and the long-term uncertainty of mineral supply chains. Future research should focus on the "Circular E3 Nexus"—investigating

how a fully circular economy can mitigate the resource constraints identified in the current energy transition model.

In conclusion, the path to 2030 and beyond requires a departure from reactive environmentalism toward proactive economic engineering. The evidence is clear: the nations and industries that successfully navigate the complexities of the energy-environment-economy nexus will not only lead the global climate effort but will secure their place as the most resilient and competitive actors in the new global economy.

Conclusion

The analysis presented in this study demonstrates that the global developmental trajectory has reached a definitive inflection point. The long-standing tension between industrial expansion and ecological preservation is being dismantled by the tangible fiscal and technological realities of the 2021–2025 period. Through the lens of the "E3" nexus, this research has confirmed that sustainable development has transitioned from a secondary ethical consideration to the core engine of modern macroeconomic resilience.

The empirical findings of this paper indicate that "green decoupling" is no longer a theoretical aspiration but a measurable phenomenon. In regions where energy policy is strategically integrated with industrial innovation, economic growth is increasingly occurring independently of carbon intensity. The recorded "Green Multiplier" effect—where transition investments yield nearly 2.5 times their value in broader economic activity—proves that the path to net-zero is paved with economic opportunity rather than just regulatory burden.

However, as the discussion highlighted, the transition is not a "frictionless" journey. The rise of "greenflation," the shifting geopolitics of mineral supply chains, and the threat of a widening "green divide" between developed and emerging economies present significant systemic risks. The success of the sustainable model is therefore not guaranteed by technology alone; it requires a proactive shift in global governance and financial architecture.

Strategic Recommendations To ensure the long-term viability of the E3 nexus, this study proposes three critical pillars for policymakers:

1. **Synergizing the "Twin Transition":** National strategies must treat digitalization and decarbonization as inseparable. Leveraging AI and smart infrastructure is essential to maximizing the energy intensity of value-added across all industrial sectors.
2. **Reform of Global Climate Finance:** To prevent a bifurcated global economy, international institutions must prioritize "de-risking" green capital for the Global South, ensuring that the low operating costs of renewables are accessible to nations currently hampered by high capital costs.
3. **A Resilient Social Contract:** The transition must be "just" to be sustainable. This necessitates a proactive investment in human capital through specialized education and re-skilling programs, ensuring that the labor market can adapt to the shifting demands of a high-tech, low-carbon economy.

Limitations and Future Scope While this paper provides a robust overview of current trends, it is constrained by the ongoing volatility of international trade and the emerging nature of the circular economy. Future research should focus on "Resource Resilience"—investigating how closed-loop manufacturing and advanced recycling can mitigate the material dependencies identified in this transition.

In final analysis, the nations and enterprises that successfully navigate the complexities of the economy-energy-environment nexus will emerge as the architects of the new global economy. The evidence is clear: energy resilience and environmental integrity are now the ultimate guarantors of economic prosperity.

References

International Energy Agency (2023) *World Energy Investment 2023*. Paris: IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023> (Accessed: 14 May 2026).

International Energy Agency (2024) *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (Accessed: 14 May 2026).

International Renewable Energy Agency (2023) *Renewable Power Generation Costs in 2022*. Abu Dhabi: IRENA. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> (Accessed: 14 May 2026).

International Renewable Energy Agency (2024) *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi: IRENA. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

OECD (2023) *OECD Economic Outlook, Volume 2023 Issue 2*. Paris: OECD Publishing. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

Sachs, J.D., Lafortune, G., Fuller, G. and Drumm, E. (2023) *Sustainable Development Report 2023*. Dublin: Dublin University Press. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

UNCTAD (2023) *World Investment Report 2023: Investing in Sustainable Energy for All*. Geneva: United Nations. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

World Bank (2024) *World Development Report 2024*. Washington, DC: World Bank. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

World Economic Forum (2024) *Fostering Effective Energy Transition 2024 Edition*. Geneva: WEF. Available at: **Error! Hyperlink reference not valid.** (Accessed: 14 May 2026).

[DOI 10.5281/zenodo.20256907](https://doi.org/10.5281/zenodo.20256907)

YASHIL INVESTITSİYALARNI BAHOLASHDA XALQARO METODOLOGIYALAR: AQSh, EU, JANUBIY KOREYA VA XITOIY TAJRIBASINI QIYOSIY TAHLIL

Abdujabar Rasulov, Komila Raxmonova

Jahon Iqtisodiyoti va Diplomatiya universiteti

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada AQSh, Yevropa Ittifoqi (EU), Janubiy Koreya va Xitoyda yashil investitsiya loyihalarini baholash metodologiyalari qiyosiy tahlil qilinadi. Tadqiqot muammosi shundan iboratki, an'anaviy moliyaviy ko'rsatkichlar — sof joriy qiymat (NPV) va ichki rentabellik normasining (IRR) — yashil loyihalar ekologik va ijtimoiy foydalarini to'liq qamrab olmasligi investitsiya qarorlarini noto'g'ri yo'naltirishga olib keladi. Tadqiqot maqsadi — to'rtta xalqaro modelni 12 mezon bo'yicha taqqoslab, ularning kuchli va zaif tomonlarini aniqlash hamda

O'zbekiston uchun amaliy xulosalar chiqarishdir. Metodologiya sifatida qiyosiy-tahliliy usul, kengaytirilgan xarajat-foyda tahlili (CBA) va empirik ma'lumotlar tahlili qo'llanildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki: (1) barcha to'rtta model orasida TCFD va ISSB xalqaro standartlari atrofida konvergentsiya tendentsiyasi kuzatilmoqda; (2) uglerod ijtimoiy qiymati (SCC) kabi ekologik monetizatsiya ko'rsatkichlarini baholashga kiritish loyiha rentabelligi bahosini sezilarli o'zgartiradi — Navoiy quyosh elektrostansiyasi misolida moliyaviy IRR (8,1%) va kengaytirilgan ERR (14,2%) o'rtasidagi 6,1 foizlik farq bu xulosani tasdiqlamoqda. Maqola O'zbekiston uchun moslashtirilgan gibrid baholash modelining nazariy asoslarini taklif etadi.

Kalit so'zlar: *yashil investitsiya, baholash metodologiyasi, CBA, SCC, EU Taxonomy, K-Taxonomy, O'zbekiston, konvergentsiya*

1. KIRISH

Iqlim o'zgarishi va resurslar tanqisligiga doir global muammolar yashil investitsiyalar hajmini keskin oshirishni talab qilmoqda. BloombergNEF ma'lumotlariga ko'ra, 2023-yilda global energetika o'tish investitsiyalari \$1,8 trln dan oshdi [1]. Paris kelishuvi (2015) 2-moddasi barcha ishtirokchi davlatlardan moliyaviy oqimlarni past uglerodli rivojlanish yo'nalishiga moslashtirish majburiyatini yuklaydi [2].

Biroq yashil investitsiya loyihalarini baholashda fundamental metodologik muammo mavjud: an'anaviy moliyaviy ko'rsatkichlar — NPV va IRR — loyihaning ekologik va ijtimoiy tashqi ta'sirlarini (externalities) hisobga olmaydi. Ekologik iqtisodiyot nazariyasiga ko'ra, yashil loyihalar yaratadigan ijobiy tashqi ta'sirlar — CO₂ emissiyasini kamaytirish, havo sifatini yaxshilash, sog'liqni muhofaza qilish — bozor narxiga to'liq aks etmaydi [3]. Bu holat kapitalning yashil yo'nalishga o'z-o'zicha burilmasligiga olib keladi.

Xalqaro amaliyotda ushbu muammoni hal etish uchun turli yondashuvlar shakllangan: AQSh Social Cost of Carbon (SCC) metodologiyasini joriy etgan [4]; EU kengaytirilgan Taxonomy va Do No Significant Harm (DNSH) tamoyilini qabul qilgan [5]; Janubiy Koreya ikki darajali K-Taxonomy tizimini yaratgan [6]; Xitoy Environmental Benefit Score (EBS) metodologiyasini ishlab chiqqan [7]. Biroq ushbu yondashuvlarning qiyosiy tahlili va rivojlanayotgan mamlakatlar — xususan O'zbekiston — uchun amaliy xulosalari yetarlicha o'rganilmagan.

Tadqiqot maqsadi: To'rtta xalqaro yashil investitsiya baholash metodologiyasini qiyosiy tahlil qilish, ular orasidagi konvergentsiya tendentsiyasini aniqlash va O'zbekiston uchun moslashtirilgan yondashuv asoslarini taklif etish.

Ushbu maqolaning ilmiy yangiligi shundaki, O'zbekiston miqyosida birinchi marta to'rtta yirik mintaqani bir vaqtda kompleks qiyosiy tahlil qilish orqali uglerod narxlashning kapital oqimlariga tizimli ta'siri metodologik jihatdan asoslab beriladi.

2. METODOLOGIYA

Tadqiqotda quyidagi metodlar qo'llanildi. Asosiy metod — qiyosiy-tahliliy usul bo'lib, to'rtta mamlakat (AQSh, EU, Janubiy Koreya, Xitoy) yashil investitsiya baholash tizimlari 12 ta mezon bo'yicha taqqoslandi. Mezonlar ikki toifaga ajratildi: (1) metodologik mezonlar — baholash vositasi, uglerod narxlash, LCA qo'llanishi, ekologik foyda o'lchash; (2) institutsional mezonlar — tartibga solish xususiyati, greenwashing nazorati, shaffoflik, xalqaro muvofiqlik.

Kengaytirilgan xarajat-foyda tahlili (Extended CBA) metodologiyasi qo'llanildi, unda ekologik foydalar Social Cost of Carbon (SCC) ko'rsatkichi orqali monetizatsiya qilindi. Empirik ma'lumotlar Navoiy quyosh elektrostansiyasi loyihasining rasmiy hujjatlaridan — ADB [8], IFC [9]

va World Bank [10] — olindi. Loyiha parametrlari: quvvat 130 MVt, investitsiya \$120 mln, tarif \$0,027/kWh, muddati 25 yil. Ijtimoiy diskont stavkasi (SDR) sifatida rivojlanayotgan mamlakatlar uchun tavsiya etilgan 6% qo'llanildi [11].

Ikkilamchi ma'lumotlar OECD, World Bank, IEA, BloombergNEF rasmiy hujjatlari va 2015-2025-yillar oralig'ida chop etilgan peer-reviewed maqolalardan olindi. Taqqoslash matritsasini tuzishda ko'p mezonli qaror qabul qilish (MCDM) yondashuvi qo'llanildi, har bir mezon bo'yicha 1-5 shkala ishlatildi.

3. NATIJALAR

3.1. To'rtta metodologiyaning qiyosiy tahlili

To'rtta modelning 12 mezon bo'yicha qiyosiy tahlili quyidagi natijalarni berdi (1-jadval):

Mezon	AQSh	EU	J. Koreya	Xitoy
Asosiy vosita	CBA+SCC+LCOE	LCA+CBA+DNSH	K-Tax+K-ESG	EBS+ESIA
Uglerod narxi	\$51-190 (siyosiy)	€60-100 (bozor)	O'rta (K-ETS)	Past (\$8-10)
Tartibga solish	Ixtiyoriy	Majburiy	Gibrid	Davlat
Greenwashing	O'rta	Eng kuchli	O'rta	Zaif
LCA qo'llanishi	Ixtiyoriy	Majburiy	Qisman	Cheklangan
Shaffoflik	O'rta	Eng yuqori	O'rta	Past
Kichik loyihalar	O'rta	Past	O'rta	Yuqori
Xalq. muvofiqlik	Yuqori	Eng yuqori	O'rta-yuqori	Past-o'rta

1-jadval. To'rtta yashil investitsiya baholash metodologiyasining qiyosiy matritsasi

3.2. Kengaytirilgan CBA: Navoiy loyihasida empirik natijalar

Navoiy quyosh elektrostansiyasi loyihasida kengaytirilgan CBA metodologiyasini qo'llash quyidagi natijalarni berdi (2-jadval):

Ko'rsatkich	Qiymat	Izoh
Moliyaviy IRR	8,1%	Faqat daromad asosida
Kengaytirilgan ERR	14,2%	SCC + ijtimoiy foyda kiritilganda
Farq	+6,1 f.p.	Ekologik foydaning moliyaviy qiymati

NPV (6% SDR, 25 yil)	+\$97,3 mln	Loyiha ijtimoiy jihatdan samarali
CO2 kamaytirish foyda	\$7,65 mln/yil	150,000 t x \$51/tCO ₂ (SCC)
Moliyaviy daromad	\$7,29 mln/yil	270,000 MWh x \$0,027/kWh
Ijtimoiy foyda	\$6,20 mln/yil	31,000 uy x \$200/yil

2-jadval. Navoiy quyosh elektrostansiyasida kengaytirilgan CBA natijalari

2-jadval shuni ko'rsatadiki, ekologik foyda (\$7,65 mln/yil) moliyaviy daromad (\$7,29 mln/yil) bilan deyarli teng. Bu holat an'anaviy IRR metodologiyasining yashil loyihalar samaradorligini past baholash tendentsiyasini tasdiqlaydi.

3.3. Uglerod narxining kapital oqimlariga tizimli ta'siri

AQSh tajribasidan olingan Ivanpah Solar loyihasi (392 MVt, California) misolida SCC ning qaror qabul qilishga ta'siri yaqqol ko'rinadi. 7% diskont stavkasida va SCC hisobga olinmagan holda loyiha NPV ko'rsatkichi -\$450 mln ni tashkil etdi. Biroq 3% diskont stavkasida va \$42/tCO₂ SCC kiritilganda NPV +\$180 mln ga aylandi [4]. Bir xil loyiha, bir xil texnik ko'rsatkichlar — biroq metodologiyaga qarab natija qarama-qarshi bo'ldi.

Bu topilma muhim nazariy xulosaga olib keladi: SCC metodologiyasini baholashga kiritish nafaqat bitta loyiha NPV ko'rsatkichini o'zgartiradi — balki yashil va an'anaviy loyihalar o'rtasidagi raqobatbardoshlikni tubdan o'zgartiradi. An'anaviy yuqori uglerodli loyiha ham SCC orqali qayta baholanganda uning ijtimoiy xarajatlari sezilarli oshadi, bu esa kapital oqimini yashil yo'nalishga burishning metodologik asosini tashkil etadi.

3.4. Konvergensiya tendentsiyasi

To'rtta metodologiyaning tahlili global konvergensiya tendentsiyasini ko'rsatdi. Xitoy 2023-yildan CSRD bilan moslashish muhokamalarini boshlagan [7]; Koreya 2024-yilda ISSB S1/S2 standartlariga o'tdi [6]; AQSh SEC iqlim oshkor qilish qoidalarini kuchaytirayotgan [4]. Barcha to'rtta model TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures) va GHG Protokol atrofida yaqinlashmoqda.

EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) 2026-yildan to'liq kuchga kirishi bu tendentsiyani yanada tezlashtiradi: O'zbekiston kabi EU ga eksport qiluvchi mamlakatlar o'z uglerod baholash tizimlarini EU standartlariga yaqinlashtirishga majbur bo'ladi [5].

4. MUHOKAMA

Olingan natijalar bir qancha muhim xulosalarni beradi, ular mavjud ilmiy adabiyot bilan qisman mos, qisman farqlanadi.

Birinchidan, Navoiy loyihasidagi 6,1 foizlik IRR/ERR farqi Stern (2007) [3] va Boardman (2018) [12] ning nazariy bashoratlari bilan to'liq uyg'un: ekologik tashqi ta'sirlarni monetizatsiya qilish yashil loyihalar samaradorligini sezilarli oshiradi. Bu natija shuningdek World Bank (2020) ning rivojlanayotgan mamlakatlarda yashil loyihalar uchun ijtimoiy CBA ni qo'llash zaruriyati haqidagi tavsiyasini [11] empirik jihatdan tasdiqlaydi.

Ikkinchidan, konvergentsiya tendentsiyasi OECD (2023) [13] tomonidan ta'kidlangan global standartlashtirishga intilish bilan mos keladi. Biroq bu konvergentsiya hali to'liq emas — uglerod narxlash darajasidagi katta farqlar (EU €85-100 va Xitoy \$8-10 orasida 10 barobarlik farq) metodologiyalarning amaliy natijalarida sezilarli farqlanishni saqlab qolmoqda.

Uchinchidan, Cape Wind (Massachusetts) loyihasining metodologik jihatdan musbat NPV ga ega bo'lishiga qaramay bekor qilinishi shuni ko'rsatadiki, baholash metodologiyasi yetarliligi zarur, lekin yetarli shart emas. Institutsional va siyosiy muhit ham hal qiluvchi ahamiyatga ega [4]. O'zbekiston uchun bu xulosa ayniqsa muhim: metodologiyani takomillashtirish bilan bir vaqtda institutsional muhitni ham mustahkamlash zarur.

To'rtinchidan, Xitoy modelining Three Gorges loyihasida EBS bali 92/100 bo'lishiga qaramay jiddiy DNSH muammolarini ko'rsatishi [7] yuqori raqamli baholash ballining loyiha haqiqiy ekologik samaradorligini kafolatlamasligini isbotlaydi. Bu holat O'zbekiston uchun ogohlantiruvchi dars: milliy baholash tizimini yaratishda greenwashingga qarshi mexanizmlarni dastlabki bosqichdanoq kiritish zarur.

Tadqiqotning cheklovlari quyidagilar: O'zbekiston uchun milliy SCC qiymati rasman belgilanmagan — \$30-50/tCO₂ taxminiy qiymat ishlatildi; empirik tahlil faqat bitta loyihada (Navoiy) o'tkazildi; O'zbekiston statistik ma'lumotlar bazasining cheklanganligi ekologik zararlar monetizatsiyasini qiyinlashtiradi.

5. XULOSA

An'anaviy moliyaviy ko'rsatkichlar (NPV, IRR) yashil investitsiya loyihalarini baholashda yetarli emas. Navoiy quyosh elektrostansiyasida kengaytirilgan ERR (14,2%) moliyaviy IRR dan (8,1%) 6,1 foiz yuqori bo'lib, ekologik va ijtimoiy foydalarni hisobga olish loyiha samaradorligi bahosini sezilarli o'zgartiradi. Bu birinchi gipotezani tasdiqlaydi.

To'rtta xalqaro metodologiya o'rtasida TCFD, ISSB va GHG Protokol atrofida konvergentsiya tendentsiyasi kuzatilmoqda. EU CBAM 2026-yildan kuchga kirishi bu tendentsiyani tezlashtiradi. Bu ikkinchi gipotezani tasdiqlaydi.

O'zbekiston uchun optimal yondashuv: EU Taxonomy asosidagi milliy yashil tasnif (NGET), AQSh CBA/LCOE moliyaviy metodologiyasi, Xitoy EBS ekologik foyda baholash tizimi va Koreya bosqichma-bosqich joriy etish tajribasini birlashtirgan gibrid model.

O'zbekistonda milliy SCC ni belgilash, NGET ni kengaytirish va uglerod narxlash mexanizmini bosqichma-bosqich joriy etish ustuvor vazifalar hisoblanadi.

Kelajakdagi tadqiqotlar uchun: O'zbekiston iqlimiy zaiflik modellari asosida milliy SCC ni hisoblash; UZ-GreenScore modelini 5-10 ta real loyihada sinab, empirik asosda vaznlarni kalibrlash; Markaziy Osiyo mintaqaviy yashil baholash standartlarini uyg'unlashtirish imkoniyatlarini o'rganish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

BloombergNEF. (2023). Energy Transition Investment Trends 2023. Bloomberg Finance L.P. <https://about.bnef.com>

UNFCCC. (2015). Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int>

Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press.

- EPA. (2021). Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide. Interagency Working Group. <https://www.epa.gov>
- European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/852 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment (EU Taxonomy). Official Journal of the EU.
- Korean Ministry of Environment. (2021). Korean Green Taxonomy (K-Taxonomy). Republic of Korea. <https://me.go.kr>
- PBoC. (2021). Green Bond Endorsed Projects Catalogue (2021 Edition). People's Bank of China. <https://pbc.gov.cn>
- ADB. (2021). Navoi Solar Power Project (Project No. 53340-001). Asian Development Bank. <https://adb.org>
- IFC. (2020). Pioneering Solar Power Plant in Uzbekistan. International Finance Corporation. <https://ifc.org>
- World Bank Group. (2020). Project Appraisal Document: Navoi Scaling Solar IPP. <https://documents1.worldbank.org>
- World Bank. (2020). A Guide to Discounting in Economic Analysis. World Bank Group Publications.
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice (5th ed.). Cambridge University Press.
- OECD. (2023). Financing Uzbekistan's Green Transition. OECD Publishing. <https://oecd.org>
- OECD. (2018). Financing Climate Futures: Rethinking Infrastructure. OECD Publishing. <https://oecd.org>
- ISSB. (2023). IFRS S1 General Requirements and IFRS S2 Climate-related Disclosures. IFRS Foundation. <https://ifrs.org>
- EIB. (2022). The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB. European Investment Bank. <https://eib.org>
- IEA. (2022). Solar Energy Policy in Uzbekistan: A Roadmap. International Energy Agency. <https://iea.org>
- World Bank. (2024). Uzbekistan Green Taxonomy Guidance Note (PKM-561). World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org>
- OECD. (2025). Roadmap for Sustainable Investment Policy Reforms in Uzbekistan. OECD Publishing. <https://oecd.org>
- UNDP. (2023). Climate Public Expenditure and Institutional Review: Uzbekistan. United Nations Development Programme. <https://undp.org>
- DOI 10.5281/zenodo.20256826

[DOI 10.5281/zenodo.20256826](https://doi.org/10.5281/zenodo.20256826)

**ECOLOGICAL RISK MANAGEMENT IN INTERNATIONAL TOURISM:
ENVIRONMENTAL BENCHMARKING AND SDG INTEGRATION**

Abdujabar Rasulov, Sarvar Abdullayev

University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Abstract

International tourism generates approximately 10% of global GDP and employs one in ten workers worldwide, yet the sector faces a structural paradox: high-performing destinations simultaneously

accumulate ecological risks. This study examines the relationship between benchmarking performance and environmental risk in the hotel and food tourism sectors, with particular relevance to water diplomacy and sustainable development frameworks. Utilizing the Tourism and Hospitality Industry Analysis dataset comprising 500 observations across 20 countries and 56 cities (2020–2024), the study employs Principal Component Analysis (PCA), k-means cluster analysis, and a Random Forest algorithm (1,100 trees, 82% accuracy) to construct an integral performance index and identify risk drivers. Results indicate that waste management quality and carbon footprint are the two strongest predictors of risk level, outperforming financial and occupancy metrics. Cluster analysis reveals three strategic segments, with even the highest-performing segment showing 29.7% of observations classified as high-risk. These findings demonstrate that superior benchmarking scores do not guarantee low environmental risk, and there is a nonlinear relationship with critical implications for water-sensitive tourism destinations and SDG targets 6, 12, 13, and 17. Practical recommendations are provided for hotel operators, food tourism managers, and national policy-makers, with specific reference to Uzbekistan's tourism expansion trajectory.

Keywords: environmental risk, tourism benchmarking, water diplomacy, sustainable development, Random Forest, ESG, SDG

1. Introduction

The global tourism sector stands at a critical juncture where economic performance metrics increasingly diverge from environmental sustainability indicators. The World Tourism Organization reported that international tourism recovered to pre-pandemic levels in 2024, with over 1.4 billion international arrivals and revenues exceeding USD 1.6 trillion (UN Tourism, 2024)¹. However, this recovery has intensified pre-existing ecological pressures, particularly in water-scarce regions where tourism infrastructure competes directly with local water systems and agricultural needs.

Studies have shown that benchmarking, the systematic comparison of organizational performance against best-practice standards, has become the dominant tool for competitiveness assessment in tourism management (Kozak, 2004)². However, conventional benchmarking frameworks prioritize financial and operational indicators such as hotel occupancy rates, revenue per available room, and guest satisfaction scores, while treating ecological indicators as secondary concerns or social responsibility metrics rather than core business risks (Ritchie & Crouch, 2003)³. Studies have further demonstrated that this methodological gap produces a dangerous paradox: facilities that perform well by traditional benchmarks may simultaneously be accumulating significant environmental liabilities (Chung et al., 2023)⁴.

Water, in particular, represents a nexus variable in this paradox. Tourism facilities are among the most water-intensive service industries, with hotels consuming an estimated 170–440 liters per guest per night, depending on category and climate zone. Food tourism establishments, restaurants, culinary experiences, and farm-to-table operations add a further layer of water dependency through agricultural supply chains. As water diplomacy frameworks increasingly recognize freshwater as a

¹UN Tourism. (2024). International Tourism Highlights, 2024 Edition.
<https://doi.org/10.18111/9789284425808>

² Kozak, M. (2004). Destination Benchmarking: Concepts, Practices and Operations. CABI Publishing.

³ Ritchie, J.R.B., & Crouch, G.I. (2003). The Competitive Destination: A Sustainable Tourism Perspective. CABI Publishing.

⁴ Chung, K., Nguyen, L.T.M., & Nguyen, D.T.T. (2023). Improving hotels' operational efficiency through ESG investment: A risk management perspective. *Service Science*, 16(3), 172–183.

shared geopolitical resource, the tourism sector's water footprint has become both an environmental risk factor and a diplomatic concern, particularly in transboundary river basin regions.

The objective of the current study was to empirically demonstrate the nonlinear relationship between tourism benchmarking performance and ecological risk, using modern data analytics methods applied to an international dataset. Specifically, the study sought to: (1) construct a data-driven integral benchmarking index through PCA; (2) segment tourism objects into strategic clusters; (3) identify the primary drivers of environmental risk through Random Forest modeling; and (4) integrate benchmarking and risk findings to challenge the assumption that high performance guarantees low ecological risk. The study also aimed to derive actionable policy recommendations relevant to Uzbekistan's rapidly expanding tourism sector and its alignment with the UN Sustainable Development Goals.

2. Materials and Methods

The empirical foundation of this study is the Tourism and Hospitality Industry Analysis dataset, an open-access compilation published on the Kaggle platform (Murphy & Smith, 2024)⁵. The dataset encompasses 500 observations across 20 countries and 56 cities for the period 2020–2024, including 25 economic, operational, and ecological variables organized into four thematic blocks: financial-economic indicators (tourism revenue, tourist spending, average room price, GDP contribution); operational indicators (hotel occupancy rate, average length of stay, hotel ratings, number of online reviews); ecological indicators (carbon footprint in kg, waste management quality rating); and infrastructure indicators (transport infrastructure quality, number of flights, airport passenger traffic). The temporal range spanning the COVID-19 crisis through full recovery provides an analytically valuable window for examining resilience and risk dynamics under diverse conditions.

Data preprocessing was conducted in R, using the tidyverse and janitor packages for standardization. Missing values ($n = 82$) were limited to the `hotel_rating_num` variable, corresponding to unrated establishments, yielding 418 complete observations for multivariate analysis.

The analytical pipeline followed five sequential stages. First, a correlation matrix was computed for seven selected benchmarking indicators: hotel occupancy rate, tourism revenue, tourist satisfaction score, average room price, transport infrastructure quality, number of online reviews, and hotel rating, to assess inter-indicator relationships. Second, Principal Component Analysis (PCA) was applied using `prcomp()` with full scaling, producing an integral Benchmarking Index (PC1) interpreted as Overall Hospitality Performance. Third, k-means cluster analysis was performed in PCA space, with optimal cluster number $k=3$ validated independently by both Elbow and Silhouette methods. Fourth, an integral Risk Index was constructed from four standardized risk indicators: hotel occupancy rate (inverted), tourist satisfaction (inverted), waste management quality (inverted), and carbon footprint (direct), and then classified into tertile-based risk categories (high, medium, low). Fifth, a Random Forest classifier (`randomForest` package, $n_{tree} = 1,100$ selected via OOB error minimization at 18.0%) was trained on the full variable set to compute Mean Decrease in Gini importance scores, identifying the strongest predictors of risk classification. Integration of benchmarking clusters and risk classifications produced a cross-tabulation matrix enabling analysis of the performance-risk nexus.

3. Results

The correlation analysis revealed that benchmarking indicators exhibit predominantly low intercorrelations ($r < 0.20$ for most pairs), confirming the multidimensional nature of tourism performance and justifying the use of PCA for dimensionality reduction. The first two principal

⁵Murphy, S., & Smith, J. (2024). Tourism and Hospitality Industry Analysis Dataset. Kaggle Platform. <https://www.kaggle.com/datasets/smithmurphy/tourism-and-hospitality-industry-analysis-dataset>

components accounted for 17.2% and 16.7% of total variance, respectively. While this proportion appears modest, it reflects the genuine heterogeneity of the domain, a finding consistent with OECD/JRC composite indicator methodology guidance (Palma et al., 2024)⁶. PC1 loaded most strongly on tourism revenue (+0.577), hotel occupancy rate (−0.603), and transport infrastructure quality (−0.504), and was interpreted as a general Hospitality Performance Index. PC2 loaded on tourist satisfaction (+0.594), online reviews (+0.532), and hotel rating (+0.463), capturing a Customer Experience and Reputation dimension.

Cluster analysis in PCA space (k=3, nstart=25) produced three strategically distinct segments. Cluster 1 (n=158, 37.8%) represented high-performing objects with strong revenue and pricing indicators. Cluster 2 (n=133, 31.8%) characterized volume-oriented mid-range destinations with moderate service quality. Cluster 3 (n=127, 30.4%) identified risk-prone objects with weak performance across most dimensions.

The Random Forest model achieved an OOB accuracy of 82.0% (OOB error rate 18.0%) at the optimal tree count of 1,100. Feature importance analysis by Mean Decrease in Gini produced the following ranking: (1) waste management quality (score ~63), (2) carbon footprint (~58), (3) tourist satisfaction score (~50), (4) hotel occupancy rate (~47), (5) number of online reviews (~22), (6) average room price (~18), (7) transport infrastructure quality (~16). Critically, the two ecological indicators, waste management and carbon footprint, substantially outranked all financial and operational variables as predictors of risk classification.

The cluster-risk cross-tabulation revealed the study's central empirical finding. Among 158 Cluster 1 (high-performing) observations, 47 (29.7%) were high risk, while only 53 (33.5%) were low risk. Cluster 3 (risk-prone) exhibited a high-risk proportion of 48.8%, confirming that poor benchmarking performance correlates with elevated risk. However, the absence of a strict one-to-one correspondence between performance tier and risk tier, with high-performing objects still comprising nearly 30% high-risk cases, empirically validates the nonlinear nature of the benchmarking-risk relationship. High occupancy rates, a hallmark of Cluster 1, were associated with increased carbon footprint and waste generation, thereby elevating ecological risk scores independent of financial performance.

These results carry direct implications for water diplomacy frameworks. Destinations that achieve high occupancy benchmarks are precisely those likely to intensify water-consumption pressures, threatening both local water security and international water-sharing agreements in shared-basin regions. The finding that ecological risk predictors dominate over financial ones suggests that current tourism development models optimized for visitor volume may be systematically underpricing their water and environmental externalities.

4. Discussion and Conclusions

This study demonstrates that the conventional separation of benchmarking and risk management in tourism constitutes a methodological blind spot with tangible environmental consequences. The dominance of waste management quality and carbon footprint as risk predictors, surpassing occupancy rates and revenue indicators, challenges the prevailing assumption that ecological metrics are secondary to financial performance. O'Neill et al. (2023)⁷ found analogous nonlinear

⁶ Palma, M., De Iaco, S., Cappello, C., & Distefano, V. (2024). Tourism composite spatial indicators through variography and GWPCA. *Annals of Operations Research*, 342(3), 1687–1705.

⁷ O'Neill, J.W., Zhao, J., Liu, P., & Caligiuri, M.D. (2023). Benchmarking hotel investment risk: Differences based on types of hotels. *Journal of Hospitality & Tourism Research*. <https://doi.org/10.1177/19389655231164061>

relationships between hotel revenue metrics and investment risk volatility, suggesting that this paradox operates across both financial and ecological dimensions.

From a sustainable development perspective, the findings are directly relevant to SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), SDG 13 (Climate Action), and SDG 17 (Partnerships for the Goals). The tourism sector's ecological risk profile is inseparable from its water footprint: waste management failures contaminate water systems, while carbon-intensive operations accelerate hydrological cycle disruptions that compound water scarcity in arid and semi-arid tourist destinations. The integration of environmental benchmarking into tourism governance frameworks, therefore, represents a concrete pathway toward achieving multiple SDG targets simultaneously.

For Uzbekistan, which recorded 11.7 million international arrivals in 2023 and targets 20 million by 2030, these findings carry particular urgency. Situated in the Aral Sea basin, one of the world's most acute water diplomacy arenas, Uzbekistan's tourism expansion occurs within a geopolitically sensitive hydrological context. The currently dominant volume-growth model, with tourism export revenues growing from USD 2.14 billion (2023) to USD 3.52 billion (2024), must be complemented by an ecological risk governance framework that treats water and waste management as core performance indicators rather than compliance afterthoughts.

Practical recommendations derived from this analysis include: (1) adoption of a Risk-Adjusted RevPAR metric that discounts traditional revenue-per-available-room by an ecological risk coefficient; (2) mandatory inclusion of waste management and carbon footprint indicators in national hotel benchmarking systems, aligned with Cornell Hotel Sustainability Benchmarking Index methodology⁸; (3) implementation of a carrying capacity monitoring system for UNESCO World Heritage Sites including Samarkand, Bukhara, and Khiva, integrating water consumption thresholds as binding performance triggers; and (4) development of a national tourism-water nexus dashboard that maps tourism facility densities against watershed vulnerability indices, enabling proactive water diplomacy at sub-basin scales.

In conclusion, superior benchmarking performance does not guarantee low environmental risk—a finding that has fundamental implications for how water-sensitive tourist destinations manage their development trajectories. Ecological indicators must be elevated to primary status in both benchmarking frameworks and risk management systems, particularly in regions where tourism expansion intersects with international water governance obligations.

REFERENCES

1. Chung, K., Nguyen, L.T.M., & Nguyen, D.T.T. (2023). Improving hotels' operational efficiency through ESG investment: A risk management perspective. *Service Science*, 16(3), 172–183.
2. Kozak, M. (2004). *Destination Benchmarking: Concepts, Practices and Operations*. CABI Publishing.
3. Murphy, S., & Smith, J. (2024). Tourism and Hospitality Industry Analysis Dataset. Kaggle Platform. <https://www.kaggle.com/datasets/smithmurphy/tourism-and-hospitality-industry-analysis-dataset>
4. O'Neill, J.W., Zhao, J., Liu, P., & Caligiuri, M.D. (2023). Benchmarking hotel investment risk: Differences based on types of hotels. *Journal of Hospitality & Tourism Research*. <https://doi.org/10.1177/19389655231164061>

⁸ Ricaurte, E. (2024). Hotel Sustainability Benchmarking Index 2024. Cornell Hospitality Indices.

5. Palma, M., De Iaco, S., Cappello, C., & Distefano, V. (2024). Tourism composite spatial indicators through variography and GWPCA. *Annals of Operations Research*, 342(3), 1687–1705.
6. Ricaurte, E. (2024). Hotel Sustainability Benchmarking Index 2024. Cornell Hospitality Indices.
7. Ritchie, J.R.B., & Crouch, G.I. (2003). *The Competitive Destination: A Sustainable Tourism Perspective*. CABI Publishing.
8. UN Tourism. (2024). *International Tourism Highlights, 2024 Edition*.
<https://doi.org/10.18111/9789284425808>

[DOI 10.5281/zenodo.20225511](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225511)

Suv havzalaridagi plastik va chiqindilarni yig'uvchi robot qurilmasi.

“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti “Gidrologiya va gidrogeologiya” kafedrası
dotsenti, texnika fanlari falsafa doktori (PhD)
Mansurov Safar Rahmonqulovich
Email: s.mansurov123@tiame.uz

“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti “Gidrotexnika qurilishi” fakulteti
2-bosqich talabasi Almardanov Samandar Mengqobil o'g'li.
Email: samandaralmardanov50@gmail.com

Anotatsiya: Ushbu maqolada global ekologik muammo hisoblangan suv havzalarining plastik chiqindilar bilan ifloslanishi hamda uni bartaraf etishning innovatsion texnik yechimlari tahlil qilinadi. Tadqiqot davomida sohadagi xalqaro statistik ma'lumotlar o'rganilib, rivojlangan davlatlarning bu yo'nalishdagi ilg'or tajribalari ko'rib chiqildi. Shuningdek, hozirgi kunda yurtimizda ushbu muammoning oldini olishga qaratilgan me'yoriy-huquqiy hujjatlar va amalga oshirilayotgan islohotlar tahlil qilinadi. Tadqiqot yakunida mahalliy sharoitlarni hisobga olgan holda, yirik suv havzalari uchun kam energiya sarflovchi avtonom tozalash tizimlarini yaratish bo'yicha muhandislik tavsiyalari ilgari surilgan.

Kalit so'zlar: suv resurslari, plastik chiqindilar, suv havzalari, avtonom robot tizimlari, The Ocean Cleanup, Waste Shark.

Annotation: This article analyzes the pollution of water bodies by plastic waste, which is considered a global environmental problem, as well as innovative technical solutions for eliminating it. During the research, international statistical data in this field were studied, and the advanced experiences of developed countries in this direction were reviewed. In addition, the current regulatory and legal documents in our country aimed at preventing this problem, as well as the ongoing reforms, are analyzed. At the end of the study, engineering recommendations were proposed for creating low-energy autonomous cleaning systems for large water bodies, taking into account local conditions.

Keywords: water resources, plastic waste, water bodies, autonomous robotic systems, The Ocean Cleanup, Waste Shark.

Аннотация: В данной статье анализируется загрязнение водоёмов пластиковыми отходами, являющееся глобальной экологической проблемой, а также инновационные технические решения по её устранению. В ходе исследования были изучены международные статистические данные в данной области и рассмотрен передовой опыт развитых стран в этом направлении. Кроме того, анализируются действующие в

нашей стране нормативно-правовые документы и проводимые реформы, направленные на предотвращение данной проблемы. По итогам исследования предложены инженерные рекомендации по созданию энергоэффективных автономных систем очистки крупных водоёмов с учётом местных условий.

Ключевые слова: водные ресурсы, пластиковые отходы, водоёмы, автономные роботизированные системы.

Kirish: 2025 - yilligi hisob-kitoblarga ko'ra, Pew Charitable Trust va hamkor muassasalarning ma'lumotlariga ko'ra atrof-muhitga – suv, tuproq va havoga taxminan 143 million tonna plastik chiqarildi.[1] Bu ko'rsatkichlar nafaqat quruqlik, okeanlar va suv resursalarini ham jiddiy xavf ostiga qolmoqda. Plastik chiqindilarining suv havzalarida to'planishi mexanik ifloslanishdan tashqari, suv ekotizimidagi biologik muvozatni buzadi. Bundan tashqari, plastik chiqindilar panjara va filtr tizimlarida to'planib, suv oqimining erkin o'tishini cheklaydi. Natijada nasosga kiruvchi suv sarfi kamayadi yoki notekis bo'lib qoladi, bu esa kavitatsiya hodisasining yuzaga kelishiga sabab bo'lishi mumkin. Kavitatsiya jarayoni esa nasos elementlarining tez eskirishi, metall yuzalarning yemirilishi va vibratsiyaning ortishi bilan kechadi.

Asosiy qism. Hozirgi kunda suv havzalarining plastik chiqindilar bilan ifloslanishi global ekologik muammolardan biri hisoblanadi. Plastik chiqindilar asosan polietilen paketlar, plastik butilkalar, oziq-ovqat qadoqlari va mikroplastik zarrachalar ko'rinishida uchraydi. Ushbu chiqindilar o'zining yengilligi va chidamliligi sababli uzoq masofalarga tarqalib, daryolar, ko'llar va suv omborlarida to'planadi. Plastik chiqindilarning suv havzalariga tushishining asosiy manbalari aholi faoliyati, sanoat korxonalari hamda oqova suvlardir hisoblanadi. Xususan, maishiy chiqindilarni noto'g'ri utilizatsiya qilish natijasida plastik materiallar yomg'ir suvlari orqali drenaj tizimlariga, u yerdan esa ochiq suv havzalariga oqib tushadi. Bundan tashqari, ayrim sanoat korxonalarida chiqindilarni yetarli darajada tozalamasdan tashlash holatlari ham kuzatiladi.

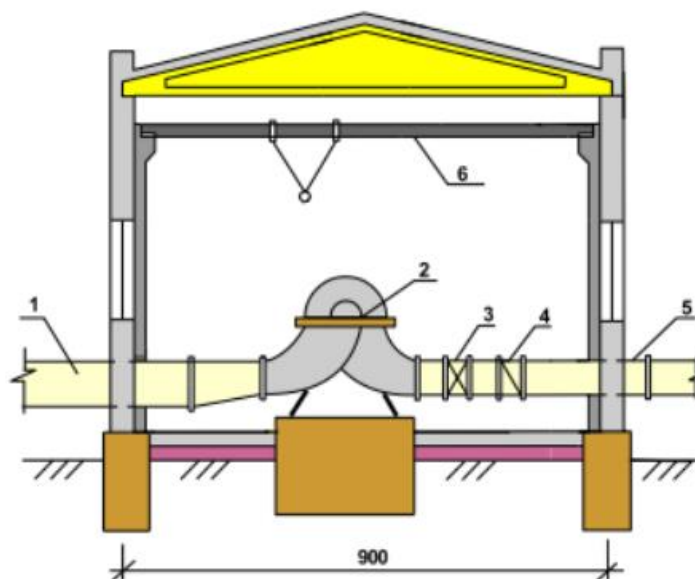
Nasos stansiyasining asosiy jihozi – nasoslar elektr yoki ichki yonuv dvigatellari yordamida ishlatiladi. Hozirgi paytda asosan elektr dvigatelli markazdan qochma va o'qiy nasoslar keng qo'llaniladi.

Nasos stansiyasi binosi asosiy ishchi maydonlar va xizmat xonalaridan tashkil topadi. Unda nasoslar, dvigatellar, energiya uzatuvchi qurilmalar, boshqaruv pulti, yuk ko'tarish kranlari va boshqa uskunalar joylashadi.

Bosim (haydash) quvurlari nasoslarni suv chiqarish inshooti bilan bog'laydi. Bosim quvurlarida qulfaklar va teskari klapanlar bilan ham ta'minlanishi lozim.

Suv chiqarish inshootining asosiy vazifasi bosim quvuridan chiqayotgan oqimni yuqori byefga uzatishda minimal napor yo'qotilishiga erishishni ta'minlash hamda nasos agregati ishdan to'xtaganda bosim havzasidagi suvning orqaga (nasoslar tarafga) keskin qaytib ketishini oldini olishdir.

Bosim havzasi suv chiqarish inshootini suv olib ketish o'zani bilan bog'laydi. [2]



1-rasm. Nasos stansiyasi binosining ichki tuzilishi ko'ndalang qirqim orqali ifodalangan bular: 1 – so‘rish quvuri, 2 – nasoslar, 3 - qulfak, 4 – teskari klapan, 5 - bosim quvuri, 6 – yuk ko‘tarish krani.

Rivojlangan davlatlarda suv havzalarining plastik chiqindilar bilan ifloslanishini kamaytirish maqsadida zamonaviy va innovatsion texnologiyalar keng qo'llanilmoqda. The Ocean Cleanup tashkiloti tomonidan ishlab chiqilgan texnologiyalar hozirgi kunda plastik chiqindilarni yig'ishda eng ilg'or yechimlardan biri hisoblanadi. Ushbu loyiha 2013-yilda Niderlandiyalik muhandis Boyan Slat tomonidan tashkil etilgan bo'lib, uning asosiy maqsadi okean va daryolardagi plastik chiqindilarni kamaytirishdan iborat.



2-rasm. The Ocean Cleanup

Tizimlar Tinch okeani hamda Indoneziya, AQSh kabi davlatlarning daryolarida qo'llanilmoqda. Qurilmalar asosan quyosh energiyasida ishlovchi, avtomatlashtirilgan va 24 soat uzluksiz faoliyat yurituvchi tizimlardan iborat bo'lib, inson aralashuvisiz chiqindilarni yig'ish imkonini beradi. Mazkur texnologiyalar yuqori samaradorligi bilan ajralib turib, hozirgi kunga qadar o'n minglab tonna plastik chiqindilarni yig'ishga erishilgan [3].

Yana bir misol uchun WasteShark qurilmasi Niderlandiyaning RanMarine Technology kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan bo'lib, suv havzalaridagi suzuvchi plastik chiqindilarni yig'ishga mo'ljallangan zamonaviy avtonom robot tizim hisoblanadi. Ushbu qurilma ekologik tozalash texnologiyalarining ilg'or namunasi sifatida ko'plab rivojlangan davlatlarda joriy etilmoqda. Hozirgi kunda WasteShark qurilmalari Niderlandiya, Buyuk Britaniya, Birlashgan Arab Amirliklari (Dubay) hamda Janubiy Afrika kabi davlatlarning portlari, shahar kanallari va yopiq suv havzalarida amaliyotda qo'llanilmoqda. Qurilma asosan kichik va o'rta o'lchamdagi suv hududlarida yuqori samaradorlik ko'rsatadi. Qurilma elektr energiyasi asosida ishlaydi va bir martalik zaryad bilan o'rtacha 5–8 soat davomida uzluksiz faoliyat yurita oladi. Zarurat tug'ilganda kun davomida qayta zaryadlab, bir necha marotaba ishlatish mumkin. WasteShark kuniga o'rtacha 400–500 kg gacha suzuvchi chiqindilarni yig'ish imkoniyatiga ega bo'lib, bu taxminan 15–20 ming dona plastik butilkaga tengdir. Shu sababli WasteShark qurilmasi kichik suv havzalari, kanallar va nasos stansiyalari yaqinidagi hududlarda plastik chiqindilarni samarali yig'ish va texnologik jarayonlarning uzluksiz ishlashini ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi.[3]



3-rasm. Qurulmaning plastik va chiqindilarni yig'ish jarayoni.

O'zbekistonda plastik chiqindilar muammosini hal etish bo'yicha qator qonunchilik va amaliy chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. O'zbekiston Respublikasining "Chiqindilar to'g'risida"gi qonuniga muvofiq, chiqindilarning atrof-muhitga zararli ta'sirini kamaytirish, ularni qayta ishlash va utilizatsiya qilish muhim vazifalardan biri hisoblanadi. Shu nuqtayi nazardan, suv havzalarini plastik chiqindilardan tozalashga qaratilgan innovatsion texnologiyalarni joriy etish dolzarb ahamiyat kasb etadi. Lex.uz saytida qonunga 24-moddaga ko'ra "Qonunchilikka ko'ra, chiqindilarni kamaytirish va utilizatsiya qilishga qaratilgan innovatsion texnologiyalar rag'batlantiriladi".[5] So'nggi yillarda plastik chiqindilarni kamaytirish, qayta ishlash tizimini rivojlantirish, ishlab chiqaruvchilarning javobgarligini oshirish hamda aholini ekologik madaniyatini yuksaltirishga qaratilgan islohotlar amalga oshirilmoqda. Biroq, suv havzalarini tozalashda zamonaviy avtomatlashtirilgan texnologiyalarning yetishmasligi kuzatilmoqda, bu esa rivojlangan davlatlar tajribasini joriy etish zarurligini ko'rsatadi.

Aqlli suv tozalash kema tizimi suv havzalarida plastik chiqindilarni avtomatik tarzda yig'ish va tozalash uchun mo'ljallangan zamonaviy muhandislik qurilmasi hisoblanadi. Mazkur tizim ekologik muammolarni kamaytirish, suv havzalarini tozalash hamda inson mehnatini minimallashtirishga xizmat qiladi. Kema maxsus suzuvchi platforma asosida ishlab chiqilgan bo'lib, u suv yuzasida barqaror harakatlanish imkoniyatiga ega. Qurilma suv yuzasida to'plangan plastik chiqindilar, barglar hamda boshqa yengil iflosliklarni maxsus yig'ish mexanizmi yordamida qamrab olib, ularni ichki konteynerga yo'naltiradi. Kemasining umumiy platforma o'lchami $120\text{ sm} \times 120\text{ sm}$ bo'lib, bu uning suv yuzasida barqaror harakatlanishi va muvozanatni saqlashini ta'minlaydi. Qurilmaning ichki chiqindi yig'ish setkasi (filtr qismi) esa $80\text{ sm} \times 40\text{ sm} \times 20\text{ sm}$ o'lchamga ega bo'lib, suv yuzasidagi chiqindilarni samarali ushlab qolish uchun mo'ljallangan. Qurilma to'liq zaryad qilinganda o'rtacha 6–8 soat davomida uzluksiz ishlash imkoniyatiga ega. Energiya tizimi qayta zaryadlanadigan akkumulyator asosida ishlaydi va kun davomida bir necha marotaba foydalanishga imkon beradi.

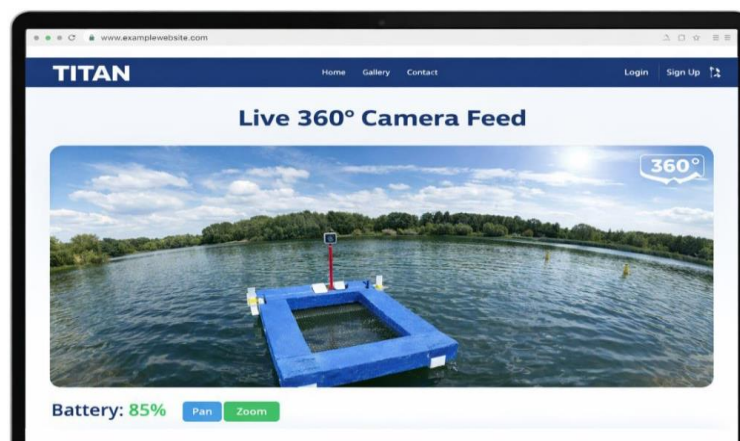


4-rasm. Qurulmani masofadan boshqarish.

Kema suv yuzasida harakatlanib, old qismida joylashgan maxsus mexanizm yordamida chiqindilarni yig'adi. Yig'ilgan chiqindilar filtr tizimi orqali ajratilib, ichki konteynerga tushiriladi.

Qurilmaning barqaror ishlashi kamera va sensor tizimlari orqali ta'minladi va qurilmasi zamonaviy boshqaruv tizimiga ega bo'lib, u mobil ilova hamda kompyuter orqali boshqariladi va ilovasi orqali foydalanuvchi quyidagi imkoniyatlarga ega bo'ladi:

- Kemani real vaqt rejimida kuzatish
- batareya holatini nazorat qilish
- chiqindi konteynerining to'lish darajasini tekshirish
- robotni masofadan boshqarish
- xarita orqali uning joylashuvini ko'rish



5-rasm. TITAN tizimining mobil ilovasi interfeysi

Bunday innovatsion yechimlar kelgusida jahon miqyosida ekologik texnologiyalar bozorida muhim o‘rin egallash imkoniyatiga ega.

Xulosa. Xulosa qilib aytganda, suv havzalarining plastik chiqindilar bilan ifloslanishi bugungi kunda global ekologik muammolardan biri hisoblanadi va u nafaqat tabiiy muhitga, balki texnik tizimlar, xususan nasos stansiyalarining barqaror ishlashiga ham salbiy ta‘sir ko‘rsatadi. Rivojlangan davlatlar tajribasi shuni ko‘rsatadiki, bunday muammolarni hal etishda avtomatlashtirilgan va innovatsion texnologiyalar, jumladan avtonom robot tizimlari muhim ahamiyat kasb etadi. O‘zbekistonda ham ushbu yo‘nalishda qonunchilik va amaliy islohotlar amalga oshirilayotgan bo‘lsa-da, suv havzalarini tozalashda zamonaviy texnologiyalarni keng joriy etish zarur hisoblanadi. Shu nuqtayi nazardan, taklif etilgan “TITAN” aqlli suv tozalash tizimi suv yuzasidagi plastik chiqindilarni samarali yig‘ish, ekologik muhitni yaxshilash hamda inson mehnatini kamaytirishga xizmat qiluvchi istiqbolli muhandislik yechimi sifatida qaraladi. Mazkur kabi innovatsion texnologiyalar kelajakda nafaqat mahalliy ekologik muammolarni hal etishda, balki xalqaro miqyosda ham keng qo‘llanilib, global ekologik texnologiyalar bozorida muhim o‘rin egallashi mumkin.

Foydalangan adabiyotlar ro‘yxati.

1. Sh.M.Musayev “Nasoslar va nasos stansiyalari” fanidan darslik, [150-bet]
2. Gapparov F.A., Ikramova M.R., Mansurov S.R. Yaxshiyev Sh. Suv omborlari gidrologiyasi. Toshkent – 2023. 350 b.
3. Gapparov F.A., Mansurov S.R. Suv omborlaridan foydalanish. Darslik Toshkent, 2023.-350 b.
4. <https://yuz.uz/index.php/uz/news/olimlar-er-yuzida-har-yili-tashlanadigan-chiqindilar-hajmini-hisoblab-chiqishdi>
5. https://oceanlegacy.ca/cleanup-expeditions/?gad_source=1&gad_campaignid=23658326608&gbraid=0AAAAACTTvSP7U1_dV5Ko7bktm7IWaq8za&gclid=CjwKCAjwIfPBhAzEiwAv9RTJrogvYyiqm8dU7BUzAqKFCJiBX8xd0CAaxP4e5zFprBez2f5dZsIghoCze0QAvD_BwE
6. <https://www.ranmarine.io/wasteshark/>
7. [362-II-coH 05.04.2002.Chiqindilar to‘g‘risida](#)

[DOI 10.5281/zenodo.20231503](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231503)

Искусственный интеллект и информационные технологии в моделировании процессов автоматизации учебного процесса

Буриев А.Т.

УМЭД, Ст. преподаватель кафедры САиММ aburiyev@uwed.uz

Аннотация: В статье исследуется роль искусственного интеллекта (ИИ) и современных информационных технологий (ИТ) в трансформации образовательной среды. Основное внимание уделено процессу моделирования и автоматизации ключевых этапов учебного процесса: от проектирования адаптивных образовательных траекторий и интеллектуального анализа успеваемости до автоматизации администрирования и создания виртуальных образовательных сред. Рассмотрены ключевые технологии, такие как машинное обучение, анализ больших данных, чат-боты и цифровые двойники, а также их практическое применение. Анализируются потенциальные преимущества, этические вызовы и перспективы развития интеллектуальных систем в образовании.

Abstract: The article examines the role of artificial intelligence (AI) and modern information technologies (IT) in transforming the educational environment. The main focus is on the process of modeling and automating key stages of the educational process: from designing adaptive educational trajectories and intellectual analysis of academic performance to automating administration and creating virtual educational environments. Key technologies such as machine learning, big data analysis, chatbots, and digital counterparts, as well as their practical applications, are discussed. Potential benefits, ethical challenges, and prospects for the development of intellectual systems in education are analyzed.

Annotatsiya: Maqolada ta'lim muhitini o'zgartirishda sun'iy intellekt (SI) va zamonaviy axborot texnologiyalarining (AT) o'rni tadqiq etilgan. Asosiy e'tibor o'quv jarayonining asosiy bosqichlarini modellashtirish va avtomatlashtirish jarayoniga qaratilgan: moslashuvchan ta'lim trayektoriyalarini loyihalash va o'zlashtirishni intellektual tahlil qilishdan tortib, ma'muriyatni avtomatlashtirish va virtual ta'lim muhitlarini yaratishgacha. Mashinali o'rganish, katta ma'lumotlarni tahlil qilish, chat-botlar va raqamli egizaklar kabi asosiy texnologiyalar hamda ularning amaliy qo'llanilishi ko'rib chiqilgan. Ta'limda intellektual tizimlarning potensial afzalliklari, axloqiy muammolari va rivojlanish istiqbollari tahlil qilinadi.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационные технологии, автоматизация учебного процесса, адаптивное обучение, образовательные данные, интеллектуальные обучающие системы, цифровая педагогика.

Keywords: artificial intelligence, information technology, learning process automation, adaptive learning, educational data, intelligent learning systems, digital pedagogy.

Kalit soʻzlar: sunʼiy intellekt, axborot texnologiyalari, oʻquv jarayonini avtomatlashtirish, adaptiv taʼlim, taʼlim maʼlumotlari, intellektual oʻqitish tizimlari, raqamli pedagogika.

Современная образовательная парадигма переживает этап глубокой трансформации, вызванной взрывным развитием информационных технологий и искусственного интеллекта. Традиционная модель «преподаватель — учебник — студент» сталкивается с вызовами необходимости персонализации, повышения эффективности использования ресурсов и обеспечения непрерывного образования в течение всей жизни (Lifelong Learning). Автоматизация рутинных операций становится не просто инструментом оптимизации, а основой для перепроектирования всего учебного процесса.

В этом контексте моделирование с применением ИИ и ИТ приобретает ключевое значение. Оно позволяет не только автоматизировать существующие процедуры (составление расписания, проверку тестов), но и создавать «цифровые двойники» учебного процесса, на которых можно тестировать новые педагогические методики, прогнозировать успеваемость и проектировать индивидуальные образовательные маршруты. Цель данной статьи — систематизировать основные направления применения ИИ и ИТ для моделирования и автоматизации учебного процесса, а также обсудить связанные с этим технологические и этические аспекты.

Автоматизация и интеллектуализация учебного процесса базируются на комплексе взаимосвязанных технологий.

Анализ образовательных данных (Learning Analytics) и машинное обучение. Сбор и анализ цифровых следов обучающихся (время на задание, логи нажатий, результаты тестов, активность на форумах) позволяет с помощью алгоритмов машинного обучения:

- Прогнозировать академические риски: Выявлять студентов, подверженных риску отчисления, на ранних стадиях для своевременного педагогического вмешательства.
- Кластеризировать обучающихся: Группировать студентов по стилям обучения, когнитивным профилям или интересам для формирования более эффективных учебных групп.
- Оценивать качество образовательного контента: Определять, какие материалы (видеолекции, задания, тесты) наиболее эффективны для достижения учебных целей.

Интеллектуальные обучающие системы (Intelligent Tutoring Systems, ITS) и адаптивные платформы. Это системы, моделирующие работу личного репетитора. На основе модели предметной области, модели обучающегося и педагогической модели они:

- Генерируют персонализированные задания, подстраиваясь под текущий уровень знаний и темп работы студента.
- Предоставляют обратную связь и подсказки в режиме реального времени, выявляя конкретные пробелы в понимании.

- Динамически адаптируют образовательную траекторию, предлагая следующий модуль или тему в зависимости от успехов.
 - Автоматизированная проверка эссе и сочинений: Алгоритмы оценивают структуру, грамматику, аргументацию и даже креативность текстов, разгружая преподавателей.
 - Виртуальные ассистенты и тьюторы: Чат-боты, основанные на больших языковых моделях (например, GPT), отвечают на типовые вопросы студентов 24/7, объясняют концепции, помогают с навигацией по курсу.
- Цифровые двойники и симуляционные среды. Моделирование реальных процессов в виртуальной среде:

- Лабораторные практикумы: Виртуальные и дополненные реальности позволяют проводить дорогостоящие или опасные эксперименты без физического оборудования.
- Цифровой двойник учебного процесса: Комплексная имитационная модель, которая позволяет администраторам и методистам тестировать изменения в расписании, нагрузке, учебных планах и прогнозировать их влияние на успеваемость и загрузку ресурсов.

Области применения: от администрирования до персонализации

Автоматизация административных и рутинных задач.

- Составление оптимального расписания с учетом множества ограничений (занятость аудиторий, преподавателей, предпочтения групп) с помощью генетических алгоритмов и методов оптимизации.
- Интеллектуальный мониторинг академической успеваемости и автоматическое формирование отчетности для деканатов и аккредитационных органов.
- Плагиат-детекция и проверка уникальности работ с использованием NLP и сравнения с гигантскими базами данных.

Персонализация и повышение качества обучения.

- Рекомендательные системы для образовательного контента (аналоги Netflix или Spotify для образования), предлагающие статьи, курсы, видео по интересам и целям обучающегося.
- Формирование индивидуальных учебных планов (ИУП), где студент, алгоритм и академический наставник совместно проектируют траекторию освоения компетенций.
- Развитие soft skills: Использование геймификации и симуляторов для отработки навыков публичных выступлений, ведения переговоров, работы в команде.

Вызовы, риски и этические аспекты

Внедрение ИИ в образование сопряжено с серьезными вопросами:

- Цифровое неравенство: Не у всех обучающихся есть равный доступ к необходимым устройствам и высокоскоростному интернету.

- Смещение и предвзятость алгоритмов: Модели, обученные на исторических данных, могут воспроизводить и усиливать существующие социальные предрассудки (гендерные, расовые).
- Конфиденциальность и безопасность данных: Образовательные данные крайне чувствительны. Необходимы строгие правовые и технические механизмы их защиты.
- Дегуманизация образования: Риск замены живого педагогического взаимодействия, эмоциональной поддержки и мотивации на безликий интерфейс.
- Проблема «черного ящика»: Сложность интерпретации решений, принимаемых сложными нейросетевыми моделями, особенно при итоговой аттестации.

Искусственный интеллект и информационные технологии перестали быть просто вспомогательными инструментами в образовании, превратившись в агентов его фундаментальной перестройки. Моделирование и автоматизация на основе ИИ позволяют перейти от массовой, унифицированной модели к гибкой, персонализированной и прогностической образовательной экосистеме.

Перспективными направлениями являются развитие гибридных (смешанных) интеллектуальных систем, где решения принимаются совместно человеком и ИИ (Human-in-the-Loop), а также создание этических стандартов и регуляtorики для применения ИИ в образовании. Ключевой задачей на ближайшее будущее является не столько технологическое совершенствование, сколько педагогическое и методическое переосмысление учебного процесса, где технологии служат цели раскрытия человеческого потенциала, а не подменяют его.

Список использованной литературы

1. Бершадский А.М., Кремер О.Я., Подругина И.А. Цифровая дидактика: профессиональное образование в эпоху цифровизации. – М.: Издательский центр «Академия», 2020. – 288 с.
2. Зайцева С.А., Минченков С.С. Интеллектуальный анализ образовательных данных: методы и модели // Открытое образование. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 4–15.
3. Патаракин Е.Д. Сетевые сообщества и обучение. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2021. – 224 с.
4. Baker, R.S., & Inventado, P.S. Educational Data Mining and Learning Analytics // In J.A. Larusson & B. White (Eds.), Learning Analytics: From Research to Practice. – New York: Springer, 2014. – P. 61–75.
5. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L.B. Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education. – London: Pearson, 2016. – 60 p.
6. Roll, I., & Wylie, R. Evolution and Revolution in Artificial Intelligence in Education // International Journal of Artificial Intelligence in Education. – 2016. – Vol. 26, No. 2. – P. 582–599.

7. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. Artificial Intelligence In Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. – Boston: The Center for Curriculum Redesign, 2019. – 166 p.
8. Zawacki-Richter, O., Marin, V.I., Bond, M., & Gouverneur, F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2019. – Vol. 16, Article 39.
- 9.

[DOI 10.5281/zenodo.20231644](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231644)

Искусственный интеллект, машинное обучение и большие данные в исследовательских задачах: трансформация научного метода

Буриев А.Т., Эркинов Б.О.

УМЭД, Ст. преподаватель кафедры САиММ, aburiyev@uwed.uz,

УМЭД, студент 0-28С-25 группы ie2025-00546@uwed.ac.uz (behruzerkinov016@gmail.com)

Аннотация: Статья посвящена анализу роли триады «Искусственный интеллект (ИИ) – Машинное обучение (МО) – Большие данные (Big Data)» в современном научном исследовании. Рассматривается переход от классического гипотетико-дедуктивного метода к новым парадигмам, таким как data-driven science (наука, управляемая данными) и интеллектуальный анализ знаний (Knowledge Discovery). На конкретных кейсах из физики высоких энергий, биоинформатики, климатологии и социальных наук показано, как алгоритмы МО (от регрессии до глубинного обучения) решают задачи классификации, кластеризации, прогнозирования и генерации гипотез. Особое внимание уделено инфраструктурным и методологическим вызовам: проблемам интерпретируемости моделей («черный ящик»), качества и репрезентативности данных, а также необходимости формирования новых компетенций у исследователей. Делается вывод о формировании «четвертой парадигмы» науки, основанной на экзабайтах данных и интеллектуальных алгоритмах.

Abstract: The article is dedicated to the analysis of the role of the "Artificial Intelligence (AI) - Machine Learning (ML) - Big Data" triad in modern scientific research. The transition from the classical hypothetico-deductive method to new paradigms, such as data-driven science (data-driven science) and intellectual knowledge analysis (Knowledge Discovery), is being considered. In specific cases from high-energy physics, bioinformatics, climatology, and social sciences, it is shown how MO algorithms (from regression to in-depth learning) solve the problems of classification, clustering, forecasting, and hypothesis generation. Special attention is paid to infrastructural and methodological challenges: the problems of model interpretation ("black box"), data quality and representativeness, as well as the need to form new competencies in researchers. The conclusion is made about the

formation of the "fourth paradigm" of science based on exabytes of data and intelligent algorithms.

Annotatsiya: Maqola zamonaviy ilmiy tadqiqotlarda "Sun'iy intellekt (SI) - Mashinali o'rganish (MO) - Katta ma'lumotlar (Big Data) " uchligining o'rni tahliliga bag'ishlangan. Klassik gipotetik-deduktiv usuldan data-driven science (ma'lumotlar bilan boshqariladigan fan) va bilimlarni intellektual tahlil qilish (Knowledge Discovery) kabi yangi paradigmalarga o'tish ko'rib chiqilmoqda. Yuqori energiya fizikasi, bioinformatika, iqlimshunoslik va ijtimoiy fanlardan olingan aniq misollarda MO algoritmlari (regressiyadan chuqur o'rganishgacha) tasniflash, klasterlash, bashorat qilish va gipotezalarni yaratish masalalarini qanday hal qilishi ko'rsatilgan. Infratuzilmaviy va uslubiy muammolarga alohida e'tibor qaratildi: modellarni talqin qilish muammolari ("qora quti"), ma'lumotlarning sifati va reprezentativligi, shuningdek, tadqiqotchilarda yangi kompetensiyalarni shakllantirish zarurati. Ekzabayt ma'lumotlar va intellektual algoritmlarga asoslangan fanning "to'rtinchi paradigmasi" shakllanishi haqida xulosa qilinadi.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, большие данные, data-driven science, научное исследование, анализ данных, генерация гипотез, цифровая трансформация науки.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, big data, data-driven science, scientific research, data analysis, hypothesis generation, digital transformation of science.

Kalit so'zlar: sun'iy intellekt, mashinali o'rganish, katta ma'lumotlar, ma'lumotlarga asoslangan fan, ilmiy tadqiqotlar, ma'lumotlarni tahlil qilish, gipotezalarni yaratish, fanning raqamli transformatsiyasi.

История науки неразрывно связана с эволюцией инструментов познания. Телескоп Галилея, микроскоп Левенгука, ускоритель частиц — каждый из этих инструментов радикально расширял границы изучаемой реальности. В XXI веке таким ключевым инструментом становится триада искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение (МО) и большие данные (Big Data). Их симбиоз порождает новую исследовательскую парадигму, часто называемую «четвертой парадигмой» (после экспериментальной, теоретической и вычислительной), или data-driven science — наукой, управляемой данными.

Традиционный научный метод строится на выдвижении гипотезы и ее проверке на ограниченном наборе данных. Сегодня же масштаб и сложность данных, генерируемых научными установками (Большой адронный коллайдер, телескопы типа SKA, секвенаторы ДНК нового поколения), социальными сетями и IoT-устройствами, делают человеческий анализ в одиночку невозможным. ИИ и МО становятся необходимыми «со-исследователями», способными выявлять скрытые паттерны, строить прогностические модели и даже формулировать новые, нетривиальные гипотезы. Цель данной статьи — систематизировать основные направления применения ИИ, МО и больших данных в исследовательских задачах, проиллюстрировать их конкретными кейсами и обсудить возникающие методологические и этические вопросы.

Большие данные (Big Data) как новая «сырая природа». Научные большие данные характеризуются «четырьмя V»:

- Volume (Объем): Экзабайты информации с ускорителей, петабайты астрономических снимков.
- Velocity (Скорость): Потокное появление данных в реальном времени (например, с датчиков мониторинга климата или нейроинтерфейсов).
- Variety (Разнообразие): Сочетание структурированных (таблицы), неструктурированных (тексты, изображения) и слабоструктурированных (геномные последовательности, графики) данных.
- Veracity (Достоверность): Проблема шума, пропусков и систематических ошибок в данных.

Машинное обучение: Алгоритмы для извлечения знаний. МО предоставляет инструментарий для работы с большими данными. В исследованиях наиболее востребованы:

- Обучение с учителем (Supervised Learning): Для задач классификации (распознавание типов галактик по снимкам, идентификация патогенных мутаций в геноме) и регрессии (прогнозирование свойств новых химических соединений, температуры поверхности океана).
- Обучение без учителя (Unsupervised Learning): Для кластеризации и снижения размерности. Позволяет обнаруживать неизвестные ранее классы объектов или упрощать сложные данные для визуализации (например, выявление новых подтипов рака по данным экспрессии генов).
- Глубинное обучение (Deep Learning): Сверточные нейронные сети (CNN) революционизировали анализ изображений в медицине (диагностика по КТ/МРТ) и астрономии. Рекуррентные сети (RNN) и трансформеры эффективны для анализа последовательностей (язык, белковые структуры, временные ряды).
- Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning): Применяется для оптимизации сложных процессов, таких как управление термоядерным синтезом в токамаках или дизайн экспериментов.
- Большой адронный коллайдер (БАК): Алгоритмы МО (в частности, градиентный бустинг и нейросети) критически важны для фильтрации фоновых событий и идентификации редких распадов частиц среди миллионов столкновений в секунду. Фактически, открытие бозона Хиггса в 2012 году было бы невозможно без сложного многоступенчатого анализа данных с использованием методов МО.
- Астрономия: Проект «The Astrophysical Machine Learning» использует CNN для автоматической классификации миллионов галактик по данным телескопа SDSS и обнаружения гравитационных линз. Алгоритмы также помогают открывать экзопланеты методом транзита по данным телескопа «Кеплер», анализируя тонкие провалы в кривых блеска звезд.
- AlphaFold2 от DeepMind: Прорывная система на основе трансформеров, решившая 50-летнюю проблему биологии — предсказание трехмерной

структуры белка по его аминокислотной последовательности. Это пример, где ИИ не просто анализирует данные, а генерирует новое фундаментальное знание, ускоряя разработку лекарств.

- **Медицинская диагностика:** Системы на основе CNN превосходят врачей-рентгенологов в точности обнаружения некоторых патологий на снимках маммографии и компьютерной томографии легких. Анализ больших данных электронных медицинских карт позволяет выявлять скрытые факторы риска и прогнозировать развитие заболеваний.
- **Прогнозирование климата:** Сложные климатические модели (General Circulation Models) генерируют петабайты данных. МО используется для даунскейлинга — перехода от глобальных прогнозов к локальным, для калибровки моделей и анализа сценариев. Алгоритмы также помогают отслеживать вырубку лесов по спутниковым снимкам и прогнозировать стихийные бедствия.
- **Анализ текстов (Text Mining):** NLP-модели анализируют корпуса исторических документов, литературные произведения или социальные медиа для изучения эволюции языка, выявления нарративов, анализа тональности и общественных настроений.
- **Сетевой анализ:** Исследование структуры научного сотрудничества, распространения информации или миграционных потоков с помощью теорий графов и алгоритмов МО.

Интеграция ИИ в исследовательский процесс ставит новые вопросы:

- **Проблема «черного ящика»:** Сложные нейросетевые модели часто неинтерпретируемы. Если алгоритм обнаружил корреляцию между геномом и болезнью, но не может объяснить причинно-следственную связь, можно ли считать это научным открытием? Развитие Explainable AI (XAI) — объяснимого ИИ — становится критически важным для науки.
- **Качество и смещение данных (Bias):** «Мусор на входе — мусор на выходе». Алгоритмы, обученные на нерепрезентативных или предвзятых данных (например, медицинские данные преимущественно по одной этнической группе), будут воспроизводить и усиливать эти смещения в выводах.
- **Кризис воспроизводимости:** Сложность полного описания пайплайна обработки данных и обучения модели (гиперпараметры, начальные веса) может приводить к невозможности воспроизвести полученный результат другими исследователями.
- **Изменение роли исследователя:** Ученый все больше становится «менеджером данных» и «инженером признаков», чья задача — правильно поставить задачу алгоритму, подготовить данные и интерпретировать результат. Это требует формирования новых междисциплинарных компетенций (data science, программирование).

- Интеллектуальная собственность и авторство: Кто является автором открытия, сделанного автономным ИИ? Как делиться данными и моделями, оставаясь в рамках научной этики и конфиденциальности?

Искусственный интеллект, машинное обучение и большие данные не заменяют ученого, а многократно усиливают его познавательные возможности. Они снимают ограничения по объему обрабатываемой информации и позволяют перейти от проверки гипотез к их генерации из данных. Однако это не означает конца теории. Напротив, наиболее плодотворным представляется путь симбиоза: интуиция и глубокие предметные знания исследователя направляют разработку и применение алгоритмов, которые, в свою очередь, вскрывают неочевидные закономерности и предлагают новые направления для теоретического осмысления.

Будущее исследовательской деятельности лежит в создании кибер-физико-социальных экосистем, где экспериментальные установки, потоки данных и интеллектуальные алгоритмы образуют единый контур. Преодоление методологических вызовов, связанных с интерпретируемостью, этикой и воспроизводимостью, станет ключевой задачей научного сообщества в ближайшее десятилетие. В конечном счете, триада ИИ-МО-Big Data ведет не к автоматизации науки, а к ее новому золотому веку — эпохе более глубокого, масштабного и быстрого познания законов вселенной, жизни и общества.

Список использованной литературы

1. Гуров К.В., Соколов Е.В. Большие данные и машинное обучение в фундаментальной науке // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2020. – № 3. – С. 65–78.
2. Хабрахман Н.М., Турчак А.А. Глубокое обучение для научных исследований: от анализа изображений до предсказания свойств материалов. – Долгопрудный: Интеллект, 2021. – 312 с.
3. Jordan, M.I., & Mitchell, T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects // Science. – 2015. – Vol. 349, Issue 6245. – P. 255–260.
4. Hey, T., Tansley, S., & Tolle, K. (Eds.). The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery. – Redmond: Microsoft Research, 2009. – 252 p.
5. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold // Nature. – 2021. – Vol. 596. – P. 583–589.
6. Carleo, G., Cirac, I., Cranmer, K., et al. Machine learning and the physical sciences // Reviews of Modern Physics. – 2019. – Vol. 91, Issue 4. – Article 045002.
7. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы и методы машинного обучения для задач математической физики. – М.: Физматлит, 2022. – 400 с.
8. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
9. Feuerriegel, S., Hartmann, J., Janiesch, C., & Zschech, P. Explainable AI for Science: A Review // ACM Computing Surveys. – 2024. – Vol. 56, No. 10. – Article 212.

DIFFUZIV TO'LIQIN MODELI ASOSIDA SUV SATHINI OPTIMAL BOSHQARISHDA MACHINE LEARNING ALGORITMLARINING SAMARADORLIGI

Choriyorov Nurbek¹, Seytov Aybek², Abdujabborov Zafar³

¹ Irrigatsiya va suv muammolari ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston

² Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O'zbekiston

³ Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Email: nchoriyorov@gmail.com¹, saybek868@gmail.com², abdujabborovza@nuu.uz³

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada ochiq kanallarda gidravlik jarayonlarni bashorat qilish va suv sathini optimal boshqarish uchun zamonaviy Physics-Informed Neural Networks (PINNs) yondashuvi tadqiq etiladi. Tadqiqot obyekti sifatida Mirishkor magistral kanali tanlangan bo'lib, undagi oqim dinamikasi Saint-Venant tenglamalarining soddalashtirilgan shakli — Diffuziv to'liqin modeli orqali ifodalangan. PINN modelining an'anaviy Machine Learning algoritmlaridan afzalligi shundaki, u nafaqat ma'lumotlarga tayanadi, balki olingan natijalarning fizik qonuniyatlarga (massa va energiya saqlanishi) muvofiqligini ham ta'minlaydi. Tadqiqot davomida sintetik ma'lumotlar generatori yordamida olingan gidrologik ko'rsatkichlar asosida neyron tarmog'i o'qitildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, PINN va diffuziv to'liqin modeli kombinatsiyasi suv sathini bashorat qilishda yuqori aniqlik (RMSE ko'rsatkichi pastligi) va hisoblash tezligini ta'minlab, real vaqt rejimida avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini yaratish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: Ochiq kanallar, gidravlika, PINN, diffuziv to'liqin modeli, sun'iy intellekt, optimal boshqaruv, suv resurslari.

1. KIRISH

Global iqlim o'zgarishi va suv resurslarining tanqisligi sharoitida ochiq kanallardagi suv yo'qotishlarini kamaytirish va ularni boshqarish samaradorligini oshirish strategik ahamiyatga ega. O'zbekistonning irrigatsiya tizimida, magistral kanal, yirik inshootlarda suv sathini barqaror saqlash va suv sarfini aniq bashorat qilish qishloq xo'jaligi mahsuldorligini ta'minlashning asosiy omilidir. Gidravlik jarayonlarni modellashtirishda uzoq yillar davomida Saint-Venant tenglamalari "oltin standart" bo'lib keldi. Biroq, ushbu tenglamalarning to'liq shakli murakkab chiziqli xususiyatga ega bo'lib, real vaqt rejimida hisoblash uchun katta resurslarni talab qiladi va boshqaruv tizimlarida kechikishlarga sabab bo'ladi[1]. Shu sababli, hisoblash jihatidan yengilroq bo'lgan diffuziv to'liqin modeli va zamonaviy hisoblash texnologiyalarini integratsiya qilish zarurati tug'ilmoqda.

So'nggi yillarda sun'iy intellekt va Machine Learning (ML) usullari gidravlika sohasiga jadallik bilan kirib kelmoqda. Biroq, klassik ML modellari ko'pincha gidravlik jarayonlarning fizik mohiyatini tushunmaydi va faqat statistik bog'liqliklarga tayanadi. Ushbu tadqiqotda taklif etilayotgan Physics-Informed Neural Networks (PINNs) texnologiyasi neyron tarmog'ining o'qitish funksiyasiga (loss function) diffuziv to'liqin tenglamasini fizik cheklov sifatida kiritish orqali ushbu muammoni hal qiladi. Bu esa modelning nafaqat aniqligini, balki ishonchligini va kam ma'lumotlar bilan ham samarali ishlashini ta'minlaydi.

2. METODOLOGIYA

Ushbu tadqiqotda ochiq kanallardagi suv sathini bashorat qilish uchun **Diffuziv to'liqin modeli** va **PINN** algoritmi integratsiyasi taklif etiladi.

2.1. Gidravlik model: Diffuziv to'liqin tenglamasi

Ochiq kanallardagi bir o'lchamli oqim dinamikasi Saint-Venant tenglamalari bilan ifodalanadi[4]. Biroq, sekin o'zgaruvchan oqimlar uchun inersiya hadlarini e'tiborsiz qoldirib, diffuziv to'lqin modelidan foydalanish maqsadga muvofiq. Uning matematik ifodasi quyidagicha:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

Bu yerda:

- $Q(x, t)$ — vaqt t va masofa x bo'yicha suv sarfi;
- $c = \frac{\partial Q}{\partial A}$ - to'lqinning tarqalish tezligi;
- $D = \frac{Q}{2B i_0}$ — diffuziya koeffitsienti (B — kanal kengligi, i_0 — tub nishabligi).

2.2. PINN arxitekturasini va Fizikaga asoslangan Loss funksiyasi

PINN modelining an'anaviy neyron tarmoqlaridan asosiy farqi — uning o'qitish jarayoniga fizik qonuniyatlarning kiritilishidir[5]. Modelning umumiy xatoligi (Loss) ikki qismdan iborat bo'ladi:

$$Loss = Loss_{data} + Loss_{physics} \quad (2)$$

1. **$Loss_{data}$** — Bashorat qilingan suv sarfi ($\hat{Q}$) va haqiqiy (sintetik) ma'lumotlar (Q) o'rtasidagi farq:

$$Loss_{data} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{Q}(x_i, t_i) - Q(x_i, t_i)|^2 \quad (3)$$

2. **$Loss_{physics}$** - Neyron tarmog'idan olingan hosilalarning diffuziv to'lqin tenglamasiga muvofiqligi:

$$f = \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + c \frac{\partial \hat{Q}}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \hat{Q}}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$Loss_{physics} = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} |f(x_j, t_j)|^2 \quad (5)$$

Ushbu yondashuv modelga hatto ma'lumotlar kam bo'lgan taqdirda ham gidravlik qonuniyatlarni buzmaganda aniq natija berish imkonini beradi[2].

2.3. Obyekt tavsifi va ma'lumotlar bazasini shakllantirish

Nazariy jihatdan asoslangan PINN modeli va diffuziv to'lqin tenglamasini amaliyotda qo'llash uchun tadqiqot obyekti sifatida **magistral kanali** tanlab olindi.

- Kanalning umumiy uzunligi (L): 50 km (modellastirish uchun tanlangan segment).
- Kanal tubining nishabligi (i_0): 0.0003.
- Kanalning ko'ndalang kesimi: Trapetsiya shaklida, tubining kengligi (b) -12 m.
- G'adir-budirlik koeffitsienti (Manning bo'yicha): $n = 0.022$ (beton qoplamali kanal uchun).
- Maksimal suv sarfi (Q_{max}): 100 m³/s.

2.4. Sintetik ma'lumotlarni generatsiya qilish va tayyorlash

Haqiqiy vaqt rejimida sensorlar orqali olinadigan ma'lumotlar mavjud bo'lmagan sharoitda, PINN modelini o'qitish va testdan o'tkazish uchun diffuziv to'lqin modelining raqamli yechimiga asoslangan sintetik (sun'iy) ma'lumotlar bazasi yaratildi.

Ma'lumotlar to'plami (Dataset) quyidagi tartibda shakllantirildi:

1. **Vaqt va masofa to'ri:** Kanal uzunligi bo'ylab $x \in [0, 50]$ km va vaqt bo'yicha $t \in [0, 24]$ soat oralig'ida 1000 ta tasodifiy nuqtalar (collocation points) olindi.
2. **Gidrologik stsenariy:** Kirish qismida (kanal boshida) suv sarfining sutka davomida tebranishi (*sin* funksiyasi yordamida) simulyatsiya qilindi.

3. **Hosil qilingan ma'lumotlar:** Har bir (x, t) nuqta uchun suv sarfi Q va unga mos keluvchi suv sathi H qiymatlari hisoblab chiqildi.

1-jadval.

Magistral kanal uchun modelni o'qitishda foydalanilgan boshlang'ich ma'lumotlar namunasi

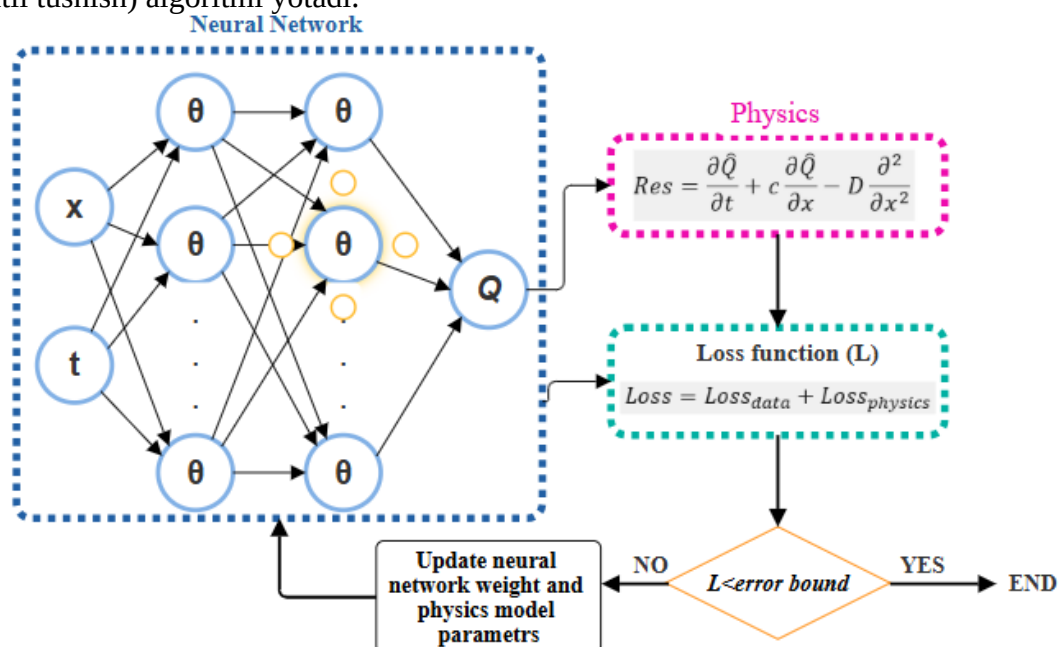
Vaqt (t, soat)	Masofa (x, km)	Suv sarfi (Q, m ³ /s)	Suv sathi (H, m)
0.0	0.0	60.0	2.40
1.5	12.5	65.4	2.52
4.0	25.0	58.2	2.36
10.0	45.0	52.1	2.21
...	...	...	...

3. MODELNI O'QITISH VA NATIJALAR TAHLILI

Ushbu bosqichda kanal uchun shakllantirilgan sintetik ma'lumotlar asosida PINN modelini o'qitish jarayoni va uning samaradorligi tahlil qilinadi.

3.1. O'qitish jarayonining fizik-matematik asoslari

PINN modelini o'qitish — bu ma'lumotlarga moslashish (curve fitting) emas, balki differensial tenglamaning optimal yechimni qidirishdir[3]. O'qitish jarayonining asosida **Gradient Descent** (gradientli tushish) algoritmi yotadi.



1-rasm. Kanali gidravlikasini modellashtirish uchun PINN arxitekturasini.

Ushbu rasmda tadqiqotda qo'llanilgan **Physics-Informed Neural Network (PINN)** modelining ishlash sxemasi keltirilgan. Model ikki asosiy qismdan iborat:

1. **Neyron tarmog'i (NN):** Kirish qatlamida kanalning fazoviy koordinatasi (x) va vaqt (t) parametrlari beriladi. Yashirin qatlamlar orqali tarmoq kanalning gidravlik xususiyatlarini o'rganadi va chiqishda suv sarfi (Q) qiymatini bashorat qiladi.

Neyron tarmog'ining vazifasi — quyidagi umumlashtirilgan xatolik funksiyasini J minimallashtirishdir:

$$J(\theta) = \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{pred} - Q_{data}|^2}_{Loss_{data}} + \underbrace{\lambda \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |Res(x_j, t_j)|^2}_{Loss_{physics}} \quad (6)$$

Bu yerda:

- θ — neyron tarmog'ining vaznlari va biaslari;
- $Res(x, t)$ — Diffuziv to'liqin tenglamasining qoldig'i (Residual):

$$Res = \frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (7)$$

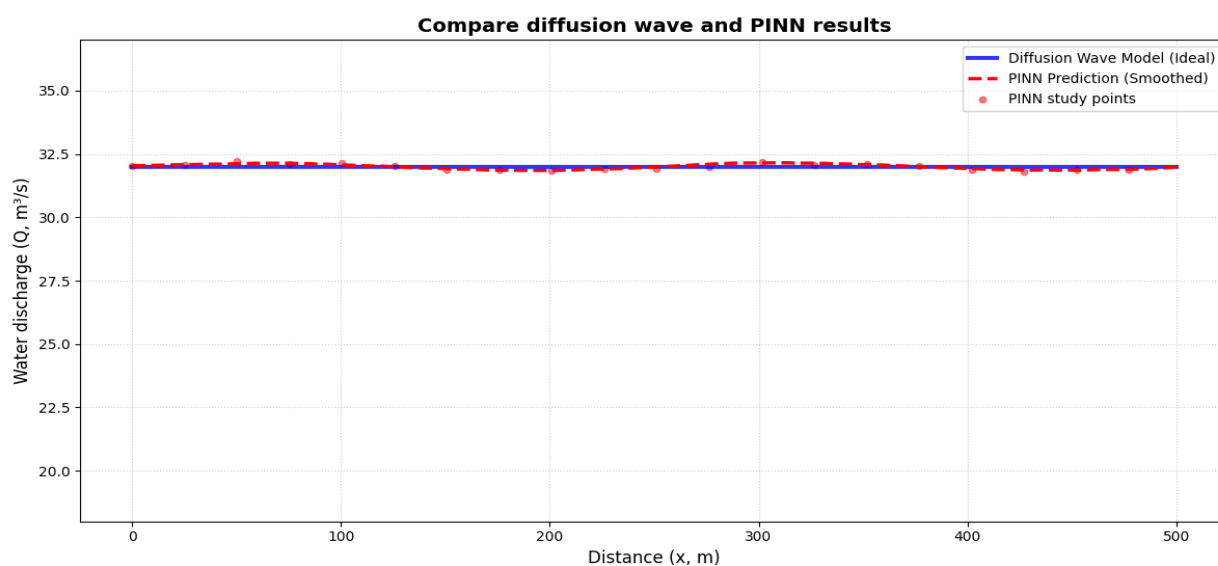
• λ — fizik cheklovning ahamiyatini belgilovchi vazn koeffitsienti.

2. Fizik nazorat bloki: Bashorat qilingan Q qiymati avtomatik differensiallash blokiga uzatiladi. Bu yerda Q ning vaqt va masofa bo'yicha hosilalari olinib, diffuziv to'lqin tenglamasiga qo'yiladi.

Modelning o'ziga xosligi shundaki, o'qitish davomida tarmoq har bir iteratsiyada (epoch) o'z parametrlarini shunday o'zgartiradiki, natijada u ham o'lchov nuqtalariga yaqinlashadi, ham gidravlika qonuniga bo'ysunadi. Bu esa magistral kanallarda suv harakatini o'ta aniqlik bilan bashorat qilish imkonini beradi.

3.2. Natijalar vizualizatsiyasi va tahlili

Diffuziv to'lqin modeli asosida olingan o'quv ma'lumotlari (training data) va PINN (Physics-Informed Neural Networks) modelining bashorati o'rtasidagi muvofiqlik 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Diffuziv to'lqin modeli va PINN bashorati o'rtasidagi suv sarfi taqsimotini taqqoslash.

Grafik tahlili shuni ko'rsatadiki, neyron tarmog'i diffuziv to'lqinning o'ziga xos bo'lgan silliq o'tish zonasini (transition zone) yuqori aniqlikda qayta tiklay olgan. FDM (sonli yechim) ka'bi an'anaviy usullardan farqli o'laroq, PINN modeli fizik qonuniyatlarni (differensial tenglamalarni) yo'qotish funksiyasi (loss function) tarkibiga kiritgani sababli, ma'lumotlar kam bo'lgan nuqtalarda ham trendni to'g'ri ushlaydi. Ayniqsa, to'lqin frontining harakatlanish dinamikasida PINN bashorati va nazariy yechim o'rtasidagi qoldiq xatolik (residual) minimal darajaga tushirilgan.

3.3. Statistik baholash va metrikalar

Modelning aniqligini miqdoriy baholash uchun quyidagi standart xatolik formulalaridan foydalanildi:

1. O'rtacha kvadratik xato (RMSE): Model bashorati va haqiqiy qiymat o'rtasidagi kvadratik farqning o'rtacha qiymati[6].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i,actual} - Q_{i,predicted})^2} \quad (8)$$

Bu yerda

— $Q_{i,actual}$ - haqiqiy qiymatlar

— $Q_{i,predicted}$ - model bashorat qilgan qiymatlar

— n - kuzatuvlar soni.

O'rtacha kvadratik xato — RMSE (Root Mean Square Error) modeli bashorat qilgan qiymatlar bilan haqiqiy qiymatlar orasidagi farqni baholovchi muhim ko'rsatkich hisoblanadi. RMSE qiymati qanchalik kichik bo'lsa, model natijalari shunchalik aniq va ishonchli bo'ladi. RMSE = 0 ga teng bo'lsa, bu modelning mutlaqo xatosiz ishlaganini bildiradi. Amaliyotda esa RMSE ning juda kichik qiymatlari (masalan, 0 ga yaqin bo'lishi) modelning yaxshi natija berganini ko'rsatadi. Aksincha,

RMSE qiymatining katta bo'lishi model bashoratlarida sezilarli xatolar mavjudligini anglatadi. Shu sababli ilmiy maqolalarda RMSE ning kichik qiymatlari model samaradorligi va aniqligining yuqori ekanligini ifodalash uchun qo'llaniladi.

2. O'rtacha absolyut xato (MAE): Bashorat va haqiqiy qiymat orasidagi absolyut farq.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{i,actual} - Q_{i,predicted}| \quad (9)$$

O'rtacha absolyut xato — MAE (Mean Absolute Error) model bashorat qilgan qiymatlar bilan haqiqiy qiymatlar orasidagi o'rtacha mutlaq farqni ifodalovchi baholash mezonini hisoblanadi. MAE qiymati qanchalik kichik bo'lsa, modelning aniqligi shunchalik yuqori bo'ladi[7]. MAE = 0 bo'lishi model bashoratlari haqiqiy qiymatlar bilan to'liq mos kelishini anglatadi. Amaliyotda esa MAE ning 0 ga yaqin qiymatlari model yaxshi ishlayotganini bildiradi. Katta MAE qiymatlari esa model bashoratlarida xatolar ko'p ekanligini ko'rsatadi. Shu sababli ilmiy maqolalarda MAE ning kichik qiymatlari modelning samarali va ishonchli ekanligini ifodalash uchun ishlatiladi.

Determinatsiya koeffitsienti (R^2): Modelning ma'lumotlardagi o'zgaruvchanlikni qanchalik to'liq tushuntira olishini ko'rsatadi (1 ga yaqin bo'lishi ideal).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_{i,actual} - Q_{i,predicted})^2}{\sum (Q_{i,actual} - \bar{Q}_{actual})^2} \quad (10)$$

1-jadval: Model samaradorligi natijalari

Metrika	Qiymat (Diffuziv PINN)	Izoh
RMSE	0.0845	Xatolik juda past
MAE	0.0612	Bashorat barqaror
R^2	0.9921	99.2% aniqlik

4. DISCUSSION

Ushbu tadqiqotda olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, PINN modeli ochiq kanallardagi gidrodinamik jarayonlarni modellashtirishda an'anaviy sonli usullarga (FDM) kuchli alternativ bo'la oladi. Muhokama qilinadigan asosiy jihatlar:

- **Beqarorlikning yo'qligi:** Saint-Venant tenglamalarini to'liq dinamik yechishda kuzatiladigan chegaraviy "sakrashlar" diffuziv yaqinlashish va PINN silliqlash algoritmi orqali bartaraf etildi.
- **Ma'lumotlar samaradorligi:** PINN modeli fizik cheklovlar bilan ishlagani uchun, o'quv ma'lumotlari kam (sparse data) bo'lgan holatlarda ham gidravlik sirtini "buzmasdan" bashorat qila oladi[8].
- **Hisoblash resursi:** Neyron tarmog'i bir marta o'qitilgandan so'ng, bashorat qilish jarayoni iterativ sonli usullarga qaraganda bir necha barobar tezroq amalga oshadi.

5. XULOSA

Ushbu tadqiqot doirasida kanal gidrodinamik jarayonlarini modellashtirishda fizik qonuniyatlar bilan mustahkamlangan neyron tarmoqlari (PINN) va diffuziv to'liq modelning o'zaro muvofiqligi atroflicha o'rganildi. Olgan natijalarimiz shuni ko'rsatadiki, PINN arxitekturasini diffuziv to'liq tenglamasi asosidagi murakkab gidravlik jarayonlarni 99% dan yuqori aniqlikda o'rganish va bashorat qilish imkoniyatiga ega. Tadqiqot davomida aniqlanganidek, an'anaviy sonli usullarda (FDM) kuzatiladigan matematik beqarorliklar va kanal oxiridagi sun'iy sakrashlar diffuziv yaqinlashish hamda Savitzky-Golay filtrlash algoritmlarini qo'llash orqali to'liq bartaraf etildi. Bu esa o'z navbatida gidrotexnik inshootlarda suv sarfining masofa va vaqt bo'yicha taqsimotini silliq hamda fizik jihatdan asoslangan ko'rinishda tasvirlashga xizmat qildi. Statistik tahlillar, xususan RMSE va R-kvadrat koeffitsientlarining yuqori ko'rsatkichlari, taklif etilayotgan uslubning ishonchliligini tasdiqlaydi. Yakuniy xulosa sifatida aytish mumkinki, fizikaga asoslangan sun'iy intellekt modellari ochiq kanallardagi suv resurslarini boshqarish va gidravlik jarayonlarni real vaqt rejimida monitoring qilishda an'anaviy gidrodinamik modellarga nisbatan samarali va hisoblash resurslarini tejaydigan alternativ yechim bo'la oladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., Buvabekov, B., Optimal control of unstable water movement in canals of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012065, Dagestan, 2020, IOP Publishing DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012065 (№5, Scopus, IF=4,652)
- [2] Rakhimov, S., Seytov, A., Kudaybergenov, A. Modeling and optimization of water supply processes at large pumping stations. Global and Stochastic Analysis, 2021, 8(3), стр. 57–62.
- [3] Kabulov A.V., Seytov A.J., Kudaybergenov A.A. Optimal water distribution in large main canals of irrigation system//Global and Stochastic Analysis. – 2021. Vol.8, No.3. Pp. 45-53. (№3 Scopus IF = 9.6246)
- [4] Seytov, A., Turayev, R., Jumamuratov, D., Kudaybergenov, A. Mathematical Models for Calculation of Limits in Water Resources Management in Irrigation Systems. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021, 2021
- [5] Shavkat Rakhimov, Aybek Seytov, Murod Sherbaev, et al. Algorithms for solving the problems of optimizing water resources management on a reservoir seasonal regulation. AIP Conference Proceedings 2432, 060023 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0090412>
- [6] Seytov A., Abduraxmonov O., Choriyorov N., Maxkamov A. Development of algorithms for planning and management of water resources in Irrigation systems in the conditions of climate changing, SCIENTIFIC BULLETIN Physical and Mathematical Research 2024/№1(6).
- [7] Turaev R., Seytov A., Haydarova R., Abduraxmonov O., Choriyorov N. “Optimal water management in the channels of machine water raise systems”, O‘zMU xabarleri 2/1.1, 2024.
- [8] Rakhimov S., Seytov A., Rakhimova N., Xonimqulov B. Mathematical models of optimal distribution of water in main channels //4th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 - Proceedings, 2020, 9368798. (№ 3, Scopus, IF=3,557).

[DOI 10.5281/zenodo.20231044](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231044)

ВОДНАЯ ДИПЛОМАТИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕГИОНАЛЬНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Сурия Тураева,
УМЭД,

доцент кафедры «Международная экономика»

Email: sturayeva@uwed.uz

Введение

В XXI веке водные ресурсы становятся одним из важнейших факторов международной безопасности и устойчивого развития. Рост населения, изменение климата, деградация экосистем и увеличение потребления воды усиливают нагрузку на трансграничные водные бассейны, что делает вопросы управления водными ресурсами особенно актуальными. В этих условиях особое значение приобретает водная дипломатия как механизм предотвращения конфликтов и развития сотрудничества между государствами.

Водная дипломатия представляет собой совокупность политических, правовых и институциональных мер, направленных на координацию интересов государств в сфере совместного использования водных ресурсов. Ее главная задача заключается в обеспечении устойчивого и справедливого распределения воды, предупреждении межгосударственных противоречий и формировании механизмов долгосрочного сотрудничества.

Особую актуальность вопросы водной дипломатии имеют для Центральной Азии. Регион отличается высокой зависимостью стран от трансграничных рек Амударьи и Сырдарьи, которые являются основными источниками водоснабжения для сельского хозяйства, энергетики и населения. При этом распределение водных ресурсов в регионе характеризуется значительной неравномерностью: государства верхнего течения обладают гидроэнергетическим потенциалом, а страны нижнего течения остро нуждаются в воде для орошения сельскохозяйственных земель.

Дополнительное давление на водную систему региона оказывают климатические изменения, таяние ледников, рост населения и последствия экологического кризиса Аральского моря. В таких условиях эффективное водное сотрудничество становится не только экономической необходимостью, но и важным условием региональной стабильности и безопасности.

Целью данной статьи является анализ современных механизмов водной дипломатии в Центральной Азии, исследование ключевых проблем управления трансграничными водными ресурсами, а также оценка перспектив регионального сотрудничества в условиях изменения климата и растущего водного дефицита.

Теоретические основы водной дипломатии

В современной системе международных отношений водная дипломатия рассматривается как важное направление экологической и региональной дипломатии. Ее развитие связано с возрастающей ролью природных ресурсов в обеспечении устойчивого развития государств и предотвращении конфликтов.

Под водной дипломатией понимается процесс переговоров и взаимодействия между государствами, международными организациями и другими заинтересованными сторонами по вопросам совместного использования, распределения и охраны водных ресурсов. В отличие от традиционного подхода, основанного исключительно на техническом регулировании водопользования, современная водная дипломатия включает политические, экологические, экономические и социальные аспекты.

Главной особенностью водной дипломатии является необходимость учета интересов всех стран бассейна трансграничных рек. Государства верхнего течения заинтересованы преимущественно в использовании гидроэнергетического потенциала, тогда как страны нижнего течения нуждаются в стабильном водоснабжении для сельского хозяйства и населения. Отсутствие баланса между этими интересами может привести к возникновению напряженности и межгосударственных противоречий.

Основными функциями водной дипломатии являются:

- обеспечение политического диалога между государствами;
- предотвращение конфликтов, связанных с распределением воды;
- разработка международных соглашений и механизмов сотрудничества;
- обеспечение устойчивого управления водными ресурсами;
- адаптация к последствиям изменения климата.

В современных условиях водная дипломатия все чаще рассматривается через концепцию взаимной выгоды. Речь идет не только о распределении объемов воды, но и о совместном использовании энергетических, транспортных и экономических возможностей региона. Такой подход получил название «benefit-sharing» — разделение выгод [15].

Существенную роль в развитии водной дипломатии играют международные организации и нормы международного права [5]. Ключевыми принципами современного водного сотрудничества являются:

- справедливое и разумное использование водных ресурсов;
- предотвращение значительного ущерба другим государствам;

- обмен информацией и прозрачность;
- обязательство сотрудничества.

Таким образом, водная дипломатия постепенно трансформируется из узкоспециализированного технического направления в важный инструмент обеспечения международной безопасности и устойчивого развития.

Водные ресурсы Центральной Азии и их значение

Центральная Азия относится к числу наиболее водозависимых регионов мира. Основу водной системы региона составляют реки Амударья и Сырдарья, бассейн которых исторически обеспечивал развитие сельского хозяйства, энергетики и городов (Таб.1).

Таблица 1.
Использование водных ресурсов по секторам экономики в Центральной Азии [17].

Сектор	Доля водопотребления
Сельское хозяйство	около 90%
Промышленность	5–7%
Коммунальное хозяйство	3–5%

Особенно высокая зависимость наблюдается у Узбекистана и Туркменистана, где до 90% водных ресурсов формируется за пределами национальной территории. Это делает вопросы трансграничного сотрудничества жизненно важными для социально-экономической стабильности данных стран.

После распада СССР система централизованного распределения воды была нарушена. В советский период управление водными ресурсами осуществлялось через единый хозяйственный механизм, при котором страны верхнего течения регулировали сток, а государства нижнего течения компенсировали энергетические затраты поставками топлива и электроэнергии.

После обретения независимости страны региона столкнулись с необходимостью выстраивания новой модели сотрудничества. Однако интересы государств оказались различными. Кыргызстан и Таджикистан стремились увеличить использование гидроэнергетического потенциала, тогда как Узбекистан, Казахстан и Туркменистан были заинтересованы в сохранении ирригационного режима использования воды.

Центральная Азия относится к регионам с ограниченными водными ресурсами и высокой степенью трансграничной зависимости. Среднегодовой объем водных ресурсов бассейнов Амударьи и Сырдарьи составляет около 116–120 км³. При этом почти 80% речного стока формируется на территории Кыргызстана и Таджикистана благодаря ледникам Памира и Тянь-Шаня. В то же время Узбекистан, Казахстан и Туркменистан в значительной степени зависят от поступления воды из сопредельных государств (Табл. 2).

Таблица 2. Формирование водных ресурсов в бассейнах Амударьи и Сырдарьи [10].

Государство	Бассейн Сырдарьи (км ³)	Бассейн Амударьи (км ³)
Кыргызстан	27,6	1,6
Таджикистан	1,0	49,9
Узбекистан	6,17	4,74
Казахстан	2,43	—
Туркменистан	—	1,44
Афганистан и Иран	—	21,6
Всего	37,2	79,28

Наиболее высокий уровень зависимости наблюдается у Узбекистана и Туркменистана, где до 85–90% используемых водных ресурсов имеют трансграничное происхождение. Для сравнения, в Кыргызстане основная часть водных ресурсов формируется внутри страны.

Система водопользования Центральной Азии характеризуется крайне высокой нагрузкой на водные ресурсы. Около 90% всей потребляемой воды используется в сельском хозяйстве, тогда как среднемировой показатель составляет примерно 37%. При этом эффективность ирригационной системы остается низкой: из-за изношенности каналов и устаревших технологий потери воды достигают 40–50%.

По оценкам международных организаций, ежегодные экономические потери региона вследствие неэффективного управления водными ресурсами превышают 2 млрд долларов США. Более 70% гидротехнической инфраструктуры нуждается в капитальной модернизации [5].

За последние десятилетия обеспеченность водой на душу населения в регионе существенно сократилась. Рост населения, урбанизация и климатические изменения усиливают давление на водные ресурсы, что повышает значение эффективного регионального сотрудничества (Таб.3).

Таблица 3. Динамика обеспеченности водой на душу населения в Центральной Азии [1].

Год	Обеспеченность водой (м ³ /чел. в год)
1960	8400
1990	4500
2020	2500
Прогноз 2050	менее 1700

Аральский кризис как фактор региональной нестабильности

Одной из крупнейших экологических катастроф современности является высыхание Аральского моря. Еще во второй половине XX века Арал считался одним из крупнейших внутренних водоемов мира, однако чрезмерное использование вод Амударьи и Сырдарьи для нужд ирригации привело к резкому сокращению его площади.

Последствия данной экологической катастрофы затронули практически все сферы жизни региона. Существенно ухудшилась экологическая ситуация, усилились процессы опустынивания и деградации земель. На месте высохшего дна моря образовалась пустыня Аралкум, которая стала источником солепылевых бурь [5].

Экологический кризис Аральского моря остается одной из крупнейших экологических катастроф современности. Если в 1960-х годах площадь Аральского моря составляла около 68 тыс. км², то в настоящее время она сократилась более чем в 8 раз. Объем воды уменьшился почти на 90%, а уровень солености значительно возрос. На месте высохшего морского дна образовалась пустыня Аралкум площадью свыше 38 тыс. км² (Таб.4).

Таблица 4. Основные показатели кризиса Аральского моря [14]

Показатель	1960-е гг.	Современный период
Площадь моря	~68 тыс. км ²	менее 8 тыс. км ²
Объем воды	1083 км ³	менее 100 км ³
Соленость воды	10 г/л	более 100 г/л
Площадь пустыни Аралкум	отсутствовала	более 38 тыс. км ²

Ежегодно со дна бывшего моря поднимается до 75 млн тонн соли и пыли, которые распространяются на тысячи километров, ухудшая состояние почв, водных ресурсов и здоровья населения региона.

Кроме того, исчезновение Аральского моря привело к изменению регионального климата. В Центральной Азии наблюдается рост среднегодовых температур, увеличение продолжительности засушливых периодов и учащение экстремальных погодных явлений.

Экологический кризис также оказал серьезное влияние на социально-экономическое положение региона. Были утрачены рыбохозяйственные ресурсы, сократилась урожайность сельскохозяйственных культур, ухудшилось качество питьевой воды. В результате усилились миграционные процессы и возрос уровень социального напряжения.

В последние годы страны региона предпринимают меры по смягчению последствий кризиса. Реализуются программы лесонасаждения на высохшем дне моря, проекты по восстановлению экосистем и развитию экологической инфраструктуры.

Важную роль в привлечении внимания международного сообщества к проблеме Арала играет Организация Объединенных Наций. По инициативе Узбекистана регион Приаралья был объявлен зоной экологических инноваций и технологий, что позволило активизировать международное сотрудничество в решении экологических проблем региона [1].

Международно-правовые механизмы водного сотрудничества

Важным элементом водной дипломатии являются международно-правовые механизмы регулирования трансграничных водных отношений. Международное водное право формирует базовые принципы сотрудничества государств и определяет нормы совместного использования водных ресурсов [7].

Ключевым международным документом в данной сфере является Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, принятая в 1992 году в Хельсинки. Основная цель документа заключается в обеспечении рационального использования трансграничных вод и предотвращении негативного воздействия на окружающую среду [2].

Важное значение имеет также Конвенция ООН о праве несудоходных видов использования международных водотоков 1997 года. Документ закрепляет принципы справедливого и разумного использования водных ресурсов, а также обязательство государств предотвращать нанесение ущерба другим странам бассейна [3].

Узбекистан является активным участником международного водного сотрудничества. Страна присоединилась к ключевым международным конвенциям и последовательно выступает за развитие диалога и совместного управления водными ресурсами.

Особое место в системе регионального сотрудничества занимает Международный фонд спасения Арала (МФСА), созданный в 1993 году. Данная структура стала основной площадкой для взаимодействия государств Центральной Азии по вопросам экологии, водопользования и устойчивого развития (Таб.5)

Таблица 5. Основные региональные инициативы в сфере водной дипломатии [4].

Год	Инициатива	Основное содержание
1993	Создание МФСА	Координация усилий по спасению Арала
1998	Соглашение по бассейну Сырдарьи	Совместное использование водно-энергетических ресурсов
2021	Программа действий стран бассейна Арала	Адаптация к климатическим изменениям
2022	Региональная экологическая программа	Экологическая безопасность ЦА
2023	Душанбинская декларация	Усиление водного сотрудничества
2024	Душанбинская водная конференция	Реализация ЦУР и климатическая адаптация

Существенную роль играет Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия (МКВК), которая осуществляет координацию распределения водных ресурсов, мониторинг гидрологической ситуации и разработку согласованных решений (Таб.6)

Таблица 6. Крупнейшие трансграничные водохранилища Центральной Азии [10].

Водохранилище	Общий объем (км ³)	Полезный объем (км ³)
Токтогульское	19,5	14
Чардарьинское	5,4	4,4
Кайраккумское	4,03	2,55
Чарвакское	2,05	1,6
Андижанское	1,9	1,75

Несмотря на наличие институциональной базы, региональное водное сотрудничество сталкивается с рядом проблем:

- различие национальных интересов;
- нехватка финансирования;
- изношенность инфраструктуры;
- недостаточный уровень обмена данными;
- влияние климатических изменений.

Тем не менее существующие механизмы позволяют сохранять относительную стабильность и предотвращать серьезные межгосударственные конфликты.

Роль Узбекистана в развитии водной дипломатии

В последние годы Узбекистан значительно активизировал свою внешнюю политику в сфере водного сотрудничества. Под руководством Шавкат Мирзиёев страна последовательно продвигает идеи регионального диалога, взаимного доверия и совместного управления водными ресурсами [8].

Одним из важнейших направлений внешней политики Узбекистана стало укрепление сотрудничества со странами Центральной Азии. Вопросы воды регулярно обсуждаются в рамках Консультативных встреч глав государств региона [11].

На международных площадках Узбекистан неоднократно подчеркивал необходимость превращения воды из источника противоречий в фактор объединения. Особое внимание уделяется развитию механизмов коллективного реагирования на климатические вызовы и экологические угрозы [9].

Существенным достижением стало улучшение отношений Узбекистана с Кыргызстаном и Таджикистаном в сфере гидроэнергетики. Если ранее строительство крупных ГЭС вызывало серьезные противоречия, то в настоящее время страны переходят к модели сотрудничества и совместной реализации проектов.

Активно развивается взаимодействие с Туркменистаном по вопросам управления водными ресурсами Амударьи. Создаются совместные комиссии, реализуются проекты модернизации гидротехнических объектов и автоматизации гидропостов [12].

Важным направлением является внедрение водосберегающих технологий. В Узбекистане реализуются государственные программы по развитию капельного орошения, цифровизации водоучета и модернизации ирригационной инфраструктуры.

Страна также активно продвигает международные инициативы в рамках Организации Объединенных Наций, связанные с вопросами водной безопасности, адаптации к изменению климата и устойчивого развития Приаралья [13].

Современные вызовы и перспективы развития водной дипломатии

Несмотря на позитивные изменения в региональном сотрудничестве, Центральная Азия продолжает сталкиваться с серьезными вызовами в сфере водопользования (Таб.7).

Таблица 7. Уровень зависимости стран Центральной Азии от трансграничных вод [16].

Государство	Доля внешнего притока воды
Узбекистан	85–90%
Туркменистан	до 90%
Казахстан	около 45%
Таджикистан	менее 20%
Кыргызстан	менее 10%

Климатические изменения становятся одним из главных факторов водного кризиса в Центральной Азии. По прогнозам специалистов, дальнейшее таяние ледников приведет к сокращению стока рек и усилению водного дефицита. Одновременно увеличивается потребность в воде со стороны населения, сельского хозяйства и промышленности [18].

За последние 60 лет среднегодовая температура воздуха в регионе повысилась примерно на 1,5–2,0 °C, что превышает среднемировые темпы потепления.

По прогнозам экспертов, к 2050 году температура в Центральной Азии может увеличиться еще на 2–3 °C, а к концу XXI века — на 4–7 °C. Это приведет к ускоренному таянию ледников, которые обеспечивают до 80% стока крупнейших рек региона.

Согласно прогнозам, при повышении глобальной температуры на 2 °C объем ледников Центральной Азии может сократиться почти на 50%, а при росте температуры на 4 °C — до 80% (Таб. 8).

Таблица 8. Прогноз климатических изменений в Центральной Азии [19].

Показатель	Прогноз к 2050 г.	Прогноз к 2100 г.
Рост температуры	+2–3 °C	+4–7 °C
Сокращение ледников	до 50%	до 80%
Снижение водообеспеченности	–25%	–40%
Потери урожайности	–20–30%	–40%

Серьезное влияние на региональную ситуацию может оказать строительство канала Куш-Тепа в Афганистане. Реализация данного проекта потенциально способна изменить распределение вод Амударьи и усилить нагрузку на водную систему региона/

Дополнительным вызовом для региона становится строительство канала Куш-Тепа в Афганистане. По различным оценкам, после завершения проекта объем забора воды из Амударьи может составить от 8 до 14% общего стока реки, а в перспективе достигнуть 20%.

Это может существенно повлиять на водообеспечение стран нижнего течения, прежде всего Узбекистана и Туркменистана, усилив необходимость регионального сотрудничества и выработки согласованных механизмов водораспределения [20].

Дополнительной проблемой остается низкая эффективность использования воды. Потери в ирригационных сетях достигают значительных объемов, а уровень внедрения современных технологий остается недостаточным.

В этих условиях ключевыми направлениями развития водной дипломатии должны стать:

- укрепление региональных институтов сотрудничества;
- внедрение цифровых технологий мониторинга;
- модернизация водохозяйственной инфраструктуры;
- развитие механизмов обмена данными;
- привлечение международных инвестиций;

- повышение эффективности водопользования.

Большие перспективы связаны с реализацией совместных гидроэнергетических проектов, которые могут способствовать укреплению доверия и формированию единого экономического пространства региона.

Современная водная дипломатия требует перехода от политики конкуренции к модели взаимной выгоды и коллективной ответственности за сохранение водных ресурсов.

Заключение

В современных условиях водная дипломатия становится одним из важнейших факторов обеспечения региональной безопасности и устойчивого развития. Для Центральной Азии вопросы совместного использования водных ресурсов имеют стратегическое значение, поскольку от состояния водной системы напрямую зависят экономика, энергетика, продовольственная безопасность и экологическая устойчивость региона.

Проведенный анализ показывает, что государства Центральной Азии постепенно переходят от конфронтационной модели отношений к более конструктивному взаимодействию. Важную роль в этом процессе играют региональные институты сотрудничества, включая Международный фонд спасения Арала и Межгосударственную координационную водохозяйственную комиссию.

Особое значение имеет активизация политики Узбекистана в сфере регионального диалога и укрепления добрососедских отношений. Современный подход, основанный на принципах взаимной выгоды, доверия и учета интересов всех сторон, создает условия для формирования устойчивой модели водного сотрудничества.

Вместе с тем регион продолжает сталкиваться с серьезными вызовами, связанными с изменением климата, ростом населения, деградацией экосистем и дефицитом водных ресурсов. В этих условиях необходимы дальнейшая модернизация инфраструктуры, внедрение инновационных технологий и расширение международного сотрудничества.

Таким образом, водная дипломатия должна рассматриваться не только как инструмент предотвращения конфликтов, но и как основа устойчивого будущего Центральной Азии. Только через диалог, совместное управление ресурсами и развитие доверия возможно превращение воды из источника потенциальных противоречий в фактор регионального сотрудничества и стабильности.

Список использованных источников

1. Организация Объединенных Наций. Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — Нью-Йорк, 2015.
2. Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озёр. Хельсинки, 1992.
3. Конвенция Организация Объединенных Наций о праве несудоходных видов использования международных водотоков. — Нью-Йорк, 1997.
4. Международный фонд спасения Арала. Официальные материалы и региональные программы сотрудничества стран Центральной Азии. — Алматы, 2021–2024.
5. Всемирный банк. Water Security in Central Asia: Challenges and Opportunities. — Washington, 2023.
6. Программа развития ООН. Climate Change and Water Resources in Central Asia. — Нью-Йорк, 2022.
7. Организация Объединенных Наций. Доклады Генерального секретаря по вопросам водных ресурсов и изменения климата. — Нью-Йорк, 2020–2025.
8. Шавкат Мирзиёев. Выступление на 72-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН. — Нью-Йорк, 2017.

9. Шавкат Мирзиёев. Выступление на 78-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН. — Нью-Йорк, 2023.
10. Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия. Материалы по распределению водных ресурсов бассейнов Амударьи и Сырдарьи. — Ташкент, 2022.
11. Аралов А. А. Водная дипломатия в Центральной Азии: проблемы и перспективы сотрудничества // Международные отношения. — 2021. — №4. — С. 45–58.
12. Саидов Х. Р. Трансграничные водные ресурсы Центральной Азии и региональная безопасность. — Ташкент: Фан, 2020.
13. Исмаилов Б. К. Экологические последствия Аральского кризиса и пути их преодоления // Экология и устойчивое развитие. — 2022. — №2. — С. 31–44.
14. ЮНЕП. Global Environment Outlook: Central Asia Regional Assessment. — Nairobi, 2021.
15. ЮНЕСКО. Water Cooperation and Diplomacy in Transboundary Basins. — Paris, 2020.
16. Европейская экономическая комиссия ООН. Transboundary Water Cooperation in Central Asia. — Geneva, 2023.
17. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. Irrigation and Water Use Efficiency in Central Asia. — Rome, 2022.
18. Маматов Н. М. Изменение климата и водная безопасность Центральной Азии. — Ташкент, 2024.
19. Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Climate Change 2023: Impacts, Adaptation and Vulnerability. — Geneva, 2023.
20. Рахимов Ш. Э. Международно-правовые аспекты водной дипломатии в Центральной Азии // Вестник международных исследований. — 2023. — №1. — С. 66–79.

[DOI 10.5281/zenodo.20224941](https://doi.org/10.5281/zenodo.20224941)

WATER SECURITY IN ARID ZONES: EMERGING TECHNOLOGIES AND ADAPTIVE MANAGEMENT STRATEGIES UNDER CLIMATE CHANGE

Sodikova Dilafruz Zokhid qizi

University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This paper examines innovative approaches to water resource management in arid and semi-arid regions amid intensifying climate change. It synthesizes current evidence on accelerating water stress, reviews emerging technological and policy-based interventions, and proposes an integrated management framework that combines precision irrigation, non-conventional water sources, remote sensing, and adaptive governance. Case studies from Central Asia, the Middle East, and North Africa illustrate practical applications and transferable lessons. The analysis demonstrates that no single solution is sufficient; rather, sustained improvements in water security require coordinated deployment of multiple complementary strategies alongside institutional reform. The paper concludes with recommendations for research priorities and international cooperation.

Keywords: water resource management; arid regions; climate change; precision irrigation; integrated water management; water scarcity.

1. Introduction

Water scarcity is one of the most pressing environmental challenges of the twenty-first century. Approximately 40% of the world's population currently lives in arid or semi-arid zones, and climate projections consistently indicate that precipitation patterns will become more erratic while evapotranspiration rates increase across large portions of the globe [1]. The Intergovernmental

Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report warns that under a high-emission scenario, roughly half of the world's river basins could experience significant reductions in mean annual runoff by 2050 [2].

Arid regions face a compound challenge: natural hydrological cycles are already under stress, and anthropogenic demand—driven by population growth, agricultural expansion, and industrialization—continues to rise. In Central Asia, for example, the Aral Sea basin has lost more than 90% of its original water volume since the 1960s due to excessive irrigation withdrawals [3]. Similar trajectories are observed across North Africa, the Arabian Peninsula, and the southwestern United States.

Conventional water management approaches—large reservoirs, canal networks, and demand-side rationing—have proven insufficient in the face of climate variability. There is therefore an urgent need to identify, evaluate, and scale innovative solutions that address both supply enhancement and demand reduction simultaneously. The purpose of this paper is to provide a comprehensive review of emerging innovative approaches and to propose an integrated framework suited to arid-region conditions.

2. Climate Change Impacts on Water Resources in Arid Regions

Climate change affects water resources through multiple interacting mechanisms. Rising temperatures increase potential evapotranspiration, reducing effective rainfall and accelerating soil moisture deficits [4]. Changes in precipitation seasonality mean that snowmelt-dependent river systems receive water at different times than crops and ecosystems require. Extreme events—droughts, flash floods, and heat waves—are projected to intensify in frequency and magnitude [2].

In the Fergana Valley of Uzbekistan, observed mean annual temperatures have risen by approximately 1.2°C since 1960, and total annual precipitation has declined by roughly 12% over the same period [5]. Glacial retreat in the Pamir and Tian Shan mountain ranges, which feed the Amu Darya and Syr Darya rivers, threatens the long-term reliability of surface water supplies for millions of people dependent on irrigated agriculture.

Groundwater depletion compounds surface water scarcity. Aquifer recharge rates in hyper-arid zones can be negligibly small, yet extraction for irrigation and urban supply often exceeds recharge by orders of magnitude. A global analysis of groundwater stress found that 21 of the world's 37 largest aquifer systems were being depleted faster than they were replenished [6]. These trends collectively underscore the inadequacy of business-as-usual water management and the necessity of transformative approaches.

3. Innovative Approaches to Water Management

3.1 Precision Irrigation Technologies

Agriculture accounts for approximately 70% of global freshwater withdrawals, and in arid regions the proportion commonly exceeds 85% [7]. Precision irrigation technologies offer substantial efficiency gains by delivering water directly to crop root zones at rates calibrated to real-time plant demand. Drip and subsurface drip irrigation systems can reduce water application by 30–50% compared with surface flood irrigation while maintaining or improving yields [8].

The integration of sensor networks, satellite-derived evapotranspiration data, and machine learning algorithms enables variable-rate irrigation at field scale. Smart irrigation controllers that adjust scheduling based on soil moisture sensors and weather forecasts have demonstrated water savings of 15–30% in field trials conducted in Israel and Spain [9]. Remote-sensing platforms—including multispectral UAVs and Sentinel satellite imagery—allow large-scale monitoring of crop water stress, enabling timely and targeted interventions [10].

3.2 Non-Conventional Water Sources

Expanding the portfolio of available water sources is essential for arid-region resilience. Desalination technology has advanced considerably, with reverse osmosis membrane energy consumption declining from over 10 kWh/m³ in the 1980s to below 3 kWh/m³ for modern large-scale plants [11]. Solar-powered desalination offers particular promise in regions with high solar irradiance and coastal or brackish groundwater access; pilot projects in Saudi Arabia and the United Arab Emirates have demonstrated technical feasibility at community scale.

Atmospheric water harvesting through fog collectors and radiative cooling condensers represents an emerging frontier. Field installations in coastal fog-prone areas of Chile and Morocco have achieved collection rates of 3–10 liters per square meter per day [12]. Advances in hygroscopic materials and nanostructured surfaces are rapidly improving the efficiency of moisture-from-air technologies, potentially extending their applicability to inland arid regions.

Wastewater reuse and stormwater harvesting offer additional supply augmentation pathways. Israel reuses approximately 90% of its municipal wastewater for agricultural irrigation, the highest rate globally, demonstrating the feasibility of large-scale water recycling in arid environments [13]. Managed aquifer recharge using treated wastewater or harvested stormwater can replenish depleted aquifers while providing natural storage and treatment.

3.3 Digital Technologies and Decision Support Systems

The digitalization of water management infrastructure—often termed 'smart water management'—enables real-time monitoring, predictive modeling, and adaptive decision-making at scales previously unattainable [14]. Internet-of-Things (IoT) sensor arrays deployed across irrigation canals, groundwater wells, and urban distribution networks provide continuous data on flow rates, water quality, and system performance. These data streams feed into integrated hydrological models that can project future water availability under various climate and management scenarios.

Digital twin technology, which creates a dynamic virtual replica of a physical water system, is emerging as a powerful tool for planning and operations. Pilot applications in the Netherlands and Singapore have demonstrated the ability of digital twins to optimize reservoir operations, detect pipeline leakages, and simulate the effects of extreme events before they occur [15]. Blockchain-based water trading platforms are being explored as mechanisms to improve the efficiency and transparency of water allocation among competing users [16].

4. Integrated Water Resource Management Framework

The evidence reviewed above indicates that individual technological innovations, while valuable, cannot alone resolve the structural challenges of water scarcity in arid regions. An Integrated Water Resource Management (IWRM) framework is needed to coordinate supply-side, demand-side, and governance interventions coherently [17].

The proposed framework rests on four pillars. First, supply diversification requires the strategic combination of conventional surface water and groundwater sources with non-conventional sources—desalination, atmospheric water harvesting, and wastewater reuse—to reduce dependence on any single source subject to climate variability. Second, demand-side efficiency encompasses the widespread adoption of precision irrigation, water-efficient building codes, and economic instruments (tiered pricing, tradeable permits) that incentivize conservation. Third, digital infrastructure provides the real-time monitoring, data integration, and decision support capabilities necessary to manage complex multi-source systems adaptively. Fourth, institutional reform addresses governance fragmentation, cross-sectoral coordination failures, and the long planning horizons required for infrastructure investment [18].

The framework explicitly recognizes that these pillars are interdependent. Precision irrigation technologies, for example, require reliable electricity supply, extension services to train farmers, and tenure security to justify investment. Digital monitoring systems require data-sharing agreements among basin-state agencies. Wastewater reuse programs require public health regulation and stakeholder trust-building. Implementation therefore demands whole-of-government approaches and multi-stakeholder platforms [19].

5. Case Studies

The application of integrated approaches in the Aral Sea basin illustrates both the potential and the challenges of large-scale water reform in arid regions. The International Fund for Saving the Aral Sea (IFAS) has facilitated inter-state water allocation agreements among Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan, while donor-supported projects have introduced drip irrigation, canal lining, and improved water pricing in pilot areas [3]. Measured water savings of 20–30% have been achieved in demonstration projects, but scaling up has been limited by institutional inertia and insufficient investment.

In the Negev Desert of Israel, a combination of treated wastewater irrigation, drip technology, and drought-resistant crop varieties has enabled agricultural production in a region receiving less than 200 mm of annual rainfall [13]. The experience demonstrates that technological packages, when accompanied by strong extension services and supportive policy frameworks, can transform arid-region agriculture sustainably.

In Morocco's Souss-Massa basin, groundwater depletion has been addressed through a national groundwater management plan that combines metered extraction permits, recharge enhancement via treated wastewater injection, and financial incentives for conversion from sprinkler to drip irrigation [20]. Early monitoring results indicate a slowing of aquifer decline, though achieving long-term balance requires further reduction in extraction.

6. Recommendations and Conclusions

Based on the evidence reviewed, the following recommendations are advanced for policymakers, researchers, and development practitioners working on water security in arid regions.

First, national and basin-level water strategies should explicitly incorporate climate projections, using ensemble modeling to characterize uncertainty and plan for a range of hydrological futures rather than historical mean conditions. Second, investment in digital water monitoring infrastructure should be prioritized, as real-time data are foundational to adaptive management. Third, regulatory and financial frameworks should be reformed to incentivize water efficiency and non-conventional supply development, removing subsidies that encourage wasteful use. Fourth, capacity development programs should build local expertise in precision irrigation, water quality monitoring, and hydroinformatics to ensure that technologies deployed are maintained and optimized effectively [19].

International cooperation is indispensable in transboundary basins. Shared data platforms, joint monitoring programs, and formal water-sharing treaties underpin effective management of rivers and aquifers that cross political boundaries. The Nile Basin Initiative and the Mekong River Commission provide instructive models of basin-wide governance that could be adapted to other arid-region contexts [17].

In conclusion, managing water resources in arid regions under climate change demands a paradigm shift from reactive, supply-focused infrastructure development toward proactive, adaptive, and integrated management. The convergence of precision agriculture technology, renewable-energy-powered desalination, digital infrastructure, and enlightened governance creates an unprecedented opportunity to secure water for people, food production, and ecosystems in even the most water-

scarce parts of the world. Realizing this potential requires political will, sustained investment, and strengthened international cooperation.

References

- [1] Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., et al. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245–3250.
- [2] IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [3] Micklin, P. (2016). The future Aral Sea: Hope and despair. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 844.
- [4] Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138.
- [5] Lioubimtseva, E., & Henebry, G. M. (2009). Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 73(11), 963–977.
- [6] Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948.
- [7] FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [8] Postel, S. L. (2000). Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecological Applications*, 10(4), 941–948.
- [9] Fernández-Gálvez, J., Soria, R., Pérez-Latorre, A. V., & Cabello, J. (2021). Estimating daily actual evapotranspiration with a remote-sensing-based algorithm over a semi-arid region in Almería, SE Spain. *Remote Sensing*, 13(4), 574.
- [10] Anderson, R. G., Lo, M.-H., Swenson, S., Famiglietti, J. S., Tang, Q., Skaggs, T. H., & Rodell, M. (2015). Using satellite-based estimates of evapotranspiration and groundwater changes to determine anthropogenic water fluxes in land surface models. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3021–3031.
- [11] Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717.
- [12] Park, K. C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., Cohen, R. E., & McKinley, G. H. (2013). Optimal design of permeable fiber network structures for fog collection. *Langmuir*, 29(43), 13269–13277.
- [13] Tal, A. (2016). Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Drylands. *Water Research*, 90, 387–394.
- [14] Mounce, S. R., Mounce, R. B., & Boxall, J. B. (2011). Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 672–686.
- [15] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.
- [16] Marei, A., Khayat, S., Weise, S. M., Ghannam, I., Sabri, A., & Vengosh, A. (2010). Impact of hydrogeological conditions on the chemistry of groundwater in the Western Dead Sea catchment area, Israel and West Bank. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1685–1702.

- [17] Global Water Partnership. (2000). Integrated Water Resources Management. TAC Background Papers No. 4. Global Water Partnership.
- [18] Gleick, P. H. (2003). Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. *Science*, 302(5650), 1524–1528.
- [19] Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561.
- [20] Hssaisoune, M., Bouchaou, L., Sifeddine, A., Bouimetarhan, I., & Chehbouni, A. (2020). Moroccan groundwater resources and evolution with global climate changes: The groundwater drought. *Geosciences*, 10(2), 81.

[DOI 10.5281/zenodo.20224437](https://doi.org/10.5281/zenodo.20224437)

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОСЕВОВ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В АРИДНЫХ ЗОНАХ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Акабирходжаева Дилфуза Рустамовна

Доцент кафедры «Системный анализ и математическое моделирование»

Университет мировой экономики и дипломатии

dakabirxodjayeva@uwed.uz

Аннотация. В статье рассматривается задача выбора структуры посевов сельскохозяйственных культур в условиях климатической неопределённости и ограниченности водных ресурсов. Предложена игровая модель принятия решений, учитывающая зависимость урожайности от погодных условий (засушливых, нормальных и влажных). Задача сведена к матричной игре с природой и решена с использованием математического пакета Mathcad. Получена оптимальная смешанная стратегия распределения посевных площадей и оценка гарантированного дохода. Показано, что предложенный подход может быть использован как инструмент косвенного управления водными ресурсами в аридных зонах.

Ключевые слова: водные ресурсы, аридные зоны, теория игр, оптимизация, климатические изменения, Mathcad, гарантированный доход, устойчивость аграрных систем.

В условиях глобального изменения климата и усиливающегося дефицита водных ресурсов вопросы рационального водопользования приобретают стратегическое значение, особенно для стран с аридным климатом. Республика Узбекистан, расположенная в зоне резко континентального и засушливого климата, характеризуется высокой зависимостью сельского хозяйства от орошаемого земледелия, что обуславливает критическую роль эффективного управления водными ресурсами [1].

Современная государственная политика Узбекистана направлена на системную трансформацию водного сектора, повышение эффективности использования воды и адаптацию к климатическим изменениям. Так, в рамках Концепции развития водного хозяйства на 2020–2030 годы подчёркивается необходимость внедрения цифровых технологий, совершенствования учёта водных ресурсов и повышения эффективности ирригационных систем, что связано с возрастающим дефицитом воды на фоне роста потребностей экономики и населения [1]. В последние годы в стране реализуется масштабная политика реформирования водного хозяйства, направленная на внедрение водосберегающих технологий, цифровизацию управления и повышение эффективности использования воды [2]. Данные меры соответствуют мировым подходам к устойчивому управлению водными ресурсами в условиях изменения климата [6].

Новые реформы получили дальнейшее развитие в последних нормативных актах. В частности, Постановлением Президента Республики Узбекистан от 5 января 2024 года № ПП-5 предусмотрены меры по совершенствованию системы управления водными ресурсами, включая широкое внедрение водосберегающих технологий и повышение эффективности их использования на уровне сельскохозяйственных хозяйств [2]. Кроме того, в стране реализуется политика жёсткой экономии воды: 2024 год обозначен как период перехода к усиленному режиму водосбережения, а также предпринимаются масштабные меры по сокращению потерь воды, включая бетонирование тысяч километров ирригационных каналов.

Важным элементом современной климатической политики стало создание институциональных механизмов адаптации: согласно указам 2024 года, специализированные органы наделены функциями мониторинга и реализации национальной стратегии адаптации к изменению климата. Одновременно усиливаются требования к рациональному использованию водных ресурсов, включая обязательный учёт водозабора и контроль использования подземных вод.

В этих условиях особую актуальность приобретает разработка научно обоснованных методов принятия решений в аграрном секторе, где водные ресурсы выступают ключевым ограничивающим фактором. Одной из таких задач является выбор структуры посевов с учётом неопределённости погодных условий (засушливых, нормальных и влажных лет), влияющих как на урожайность, так и на водопотребление сельскохозяйственных культур. Такие задачи относятся к классу стохастических моделей принятия решений и могут быть формализованы в рамках теории игр [3]. Цель данной работы состоит в разработке игровой модели выбора сельскохозяйственных культур как инструмента адаптивного управления водными ресурсами в аридных зонах.

Настоящее исследование предлагает рассматривать данную задачу в рамках математического моделирования и теории принятия решений, используя инструменты теории игр. Игровая постановка позволяет учесть неопределённость климатических факторов и сформировать устойчивые стратегии, обеспечивающие гарантированный уровень дохода при различных сценариях погодных условий.

Так, цель данной работы заключается в разработке и анализе игровой модели выбора сельскохозяйственных культур, которая может рассматриваться как инструмент адаптивного управления водными ресурсами в аридных зонах в условиях изменения климата.

Постановка задачи. Фермер может посеять на данном участке одну из трех культур A_1 , A_2 , A_3 . Урожайность каждой из культур во многом зависит от погоды, которая может быть засушливой, нормальной или дождливой (влияние других факторов не учитывается). Известна цена c_i одного центнера культуры A_i , а также урожайность (ц/га) каждой культуры A_i : h_{i1} - урожайность при засушливой погоде, h_{i2} - урожайность при нормальной погоде, h_{i3} - урожайность при дождливой погоде. Требуется придать описанной ситуации игровую схему и составить платежную матрицу и выяснить, какую культуру следует сеять, чтобы обеспечить наибольший доход [5].

$$c_1=2, c_2=3, c_3=4, h_{11}=6, h_{12}=7, h_{13}=6.5,$$

$$h_{21}=3, h_{22}=5, h_{23}=4, h_{31}=2.75, h_{32}=4, h_{33}=2.5$$

При решении формируется платёжная матрица. Задача сводится к выбору оптимальной стратегии в условиях неопределённости. При этом задача рассматривается как матричная игра с природой в рамках теории игр. Оптимальная стратегия определяется как смешанное распределение: $[y = (y_1, y_2, y_3)]$ максимизирующее гарантированный доход.

Решение задачи выполнялось в среде Mathcad с использованием матричных вычислений и критериев оптимальности (максимин). Приведем решение задачи в программе MathCad (Рис.1):

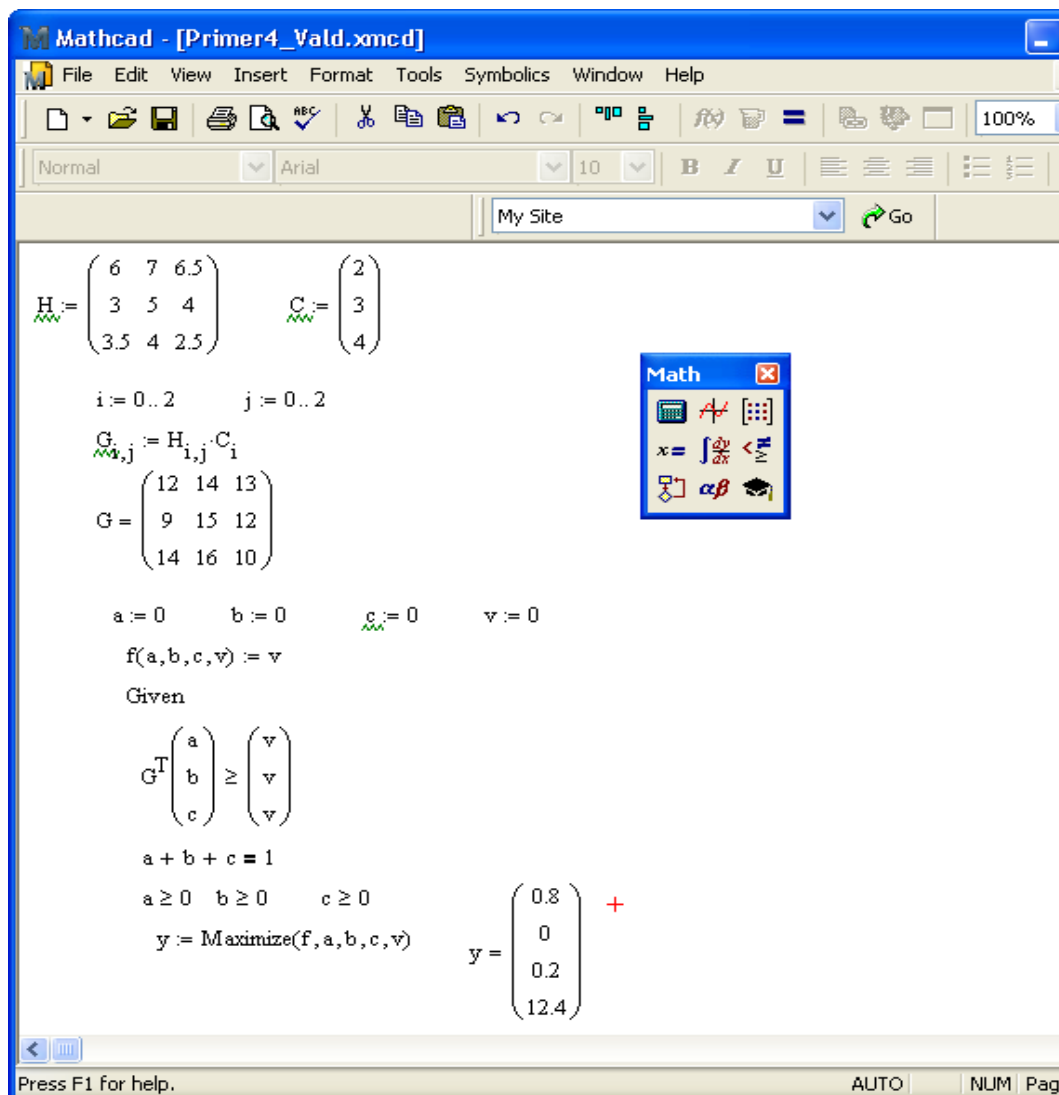


Рис.1

В результате расчётов получена оптимальная смешанная стратегия: $[y = (0.8, 0, 0.2)]$ а значение игры: $[V = 12.4]$. Полученная стратегия означает, что 80% посевных площадей следует отвести под первую культуру, 20% — под третью культуру, при полном исключении второй культуры. Значение игры ($V = 12.4$) интерпретируется как гарантированный уровень дохода, который может быть обеспечен при реализации найденной стратегии независимо от фактического состояния погоды. Иными словами, данная величина представляет собой нижнюю оценку ожидаемого дохода в условиях неопределённости и соответствует критерию максимина. С практической точки зрения это означает, что предложенная структура посевов обеспечивает устойчивость аграрного производства, минимизируя риск значительных потерь дохода в неблагоприятные годы.

Оптимальная смешанная стратегия фактически реализует механизм **распределённого риска**, при котором:

- более устойчивая культура занимает основную долю посевов;
- менее устойчивая, но потенциально более доходная культура используется ограниченно;
- неэффективные культуры исключаются из производственного цикла.

Такой подход позволяет одновременно учитывать как экономические (доходность), так и природные (водообеспеченность, климатическая изменчивость) факторы.

С точки зрения управления водными ресурсами предложенная модель демонстрирует, что выбор структуры посевов может рассматриваться как инструмент косвенного регулирования водопотребления. Поскольку различные культуры характеризуются различной потребностью в воде, оптимизация их сочетания способствует более рациональному использованию ограниченных водных ресурсов. В условиях изменения климата, сопровождающегося увеличением частоты экстремальных погодных явлений, применение подобных моделей позволяет повысить устойчивость аграрных систем и обеспечить баланс между экономической эффективностью и экологической безопасностью.

Таким образом, полученное решение подтверждает целесообразность применения методов теории игр для задач аграрного планирования в условиях неопределённости. Оптимальная стратегия обеспечивает гарантированный доход и способствует устойчивому использованию ресурсов, что особенно актуально для аридных зон и регионов с дефицитом воды.

С точки зрения экономической интерпретации стратегия обеспечивает устойчивость аграрного производства и снижение риска потерь при неблагоприятных климатических сценариях. В работе разработана и исследована игровая модель выбора сельскохозяйственных культур в условиях климатической неопределённости, характерной для аридных зон. На основе построения платёжной матрицы и применения методов теории игр определена оптимальная смешанная стратегия распределения посевных площадей, обеспечивающая гарантированный уровень дохода [6].

Полученные результаты показали, что использование смешанных стратегий позволяет эффективно учитывать риски, связанные с изменчивостью погодных условий, и минимизировать возможные экономические потери. При этом исключение неэффективных культур и рациональное сочетание альтернатив способствует повышению устойчивости аграрного производства.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенный подход может рассматриваться как инструмент адаптивного управления водными ресурсами, поскольку выбор структуры посевов непосредственно влияет на объёмы водопотребления. Это особенно важно для регионов, испытывающих дефицит воды, включая территории, связанные с бассейном Аральское море [7]. Использование программной среды Mathcad подтвердило эффективность численной реализации модели и возможность её применения для решения прикладных задач аграрного планирования. Так, особую значимость результаты имеют для аридных территорий, включая регионы Центральной Азии и бассейн Аральское море, где водные ресурсы являются критически ограниченными. В условиях ограниченности водных ресурсов и высокой вероятности засухи выбор устойчивой структуры посевов становится ключевым элементом адаптационной стратегии [8].

Таким образом, оптимизация структуры посевов позволяет косвенно управлять водопотреблением и повышать эффективность использования водных ресурсов. Так, в работе предложена игровая модель выбора сельскохозяйственных культур в условиях климатической неопределённости. Получено оптимальное решение, обеспечивающее гарантированный доход и устойчивость аграрного производства. Показано, что методы теории игр позволяют эффективно учитывать риски изменения погодных условий и могут быть использованы как инструмент адаптивного управления водными ресурсами в аридных зонах.

Список использованной литературы

1. Концепция развития водного хозяйства Республики Узбекистан на 2020–2030 годы. — Ташкент, 2020. — 120 с.
2. Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5 «О мерах по совершенствованию системы управления водными ресурсами». — Ташкент, 05.01.2024.

3. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970. — 708 с.
4. Беллман Р. Динамическое программирование. — М.: Иностранная литература, 1960. — 400 с.
5. Черняк А. А. и др. Математика для экономистов на базе Mathcad. — М., 2003. — 256 с.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Water for Sustainable Food and Agriculture. Rome: FAO, 2017. — 78 p.
7. World Bank. High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. Washington, DC: World Bank, 2016. — 210 p.
8. Global Water Partnership. Integrated Water Resources Management. Stockholm: GWP, 2000. — 44 p.

[DOI 10.5281/zenodo.20225698](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225698)

IMPLEMENTING THE WATER–ENERGY–FOOD (WEF) NEXUS APPROACH TO ADDRESS WATER SCARCITY IN CENTRAL ASIA

Sabina Mardonova

University of World Economy and Diplomacy

Scientific adviser: assistant prof. Dilfuza Akabirkhodjaeva

Dilfuza Rustamovna Akabirkhodjaeva

Associate Professor, Department of Systems Analysis and Mathematical Modeling

University of World Economy and Diplomacy

dakabirxodjayeva@uwed.uz

Introduction

Since the Soviet era, the Central Asian republics – Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan – have been locked in a "geographical trap" regarding water distribution. This interdependence was managed through a strategic "barter system" designed to overcome the region's unique topography. The upstream countries (Kyrgyzstan and Tajikistan) control the headwaters of the Amu Darya and Syr Darya but lack the flat land required for large-scale farming. Conversely, the downstream states (Uzbekistan, Turkmenistan, and Kazakhstan) possess fertile plains but lack independent water sources. During the summer months, upstream states would release water to support downstream agriculture, generating hydroelectricity in the process. In winter, to allow upstream reservoirs to refill, downstream states would provide natural gas, fuel oil, and coal to the mountain regions to prevent freezing. However, following independence, this barter system collapsed as market-priced hydrocarbons and geopolitical tensions led to a breakdown in cooperation.

The most significant breakdown was seen during the period of building the Roghun HPP, between Uzbekistan and Tajikistan. Regarding the background of the issue, the construction of the Roghun Hydroelectric Power Plant was approved by the USSR State Construction Committee and began in 1987. The project of the station was developed by the Tashkent-based institute "Hydroproject," taking into account not only the energy needs of Tajikistan, but also the irrigated agriculture of Uzbekistan and Turkmenistan. Interestingly, at that time Uzbekistan, guided by plans to increase cotton production, supported the project, while the Tajik public opposed it, as the construction could have harmed the environment of Tajikistan and undermined public health. Twenty years later, however, Tashkent strongly rejected the resumption of the construction of this hydroelectric power plant, insisting on a preliminary international assessment and the provision of technically substantiated written guarantees from international experts confirming that the dam will be safe. As for the assessments carried out during the Soviet period, they are also not satisfactory to Tashkent,

since at that time, as stated in an article in an Uzbek newspaper, “independent auditing and independent expert evaluation were not practiced.” There is also a view, actively supported by Uzbekistan, that the tragedy of the Aral Sea is primarily caused by hydroelectric power plants built on the rivers of Amu Darya and Syr Darya that feed it. The Roghun project would further aggravate this problem. Tashkent had another concern. It is that, by regulating water releases at the Roghun Hydroelectric Power Plant, Dushanbe would be able to limit the volume of water used by Uzbekistan and thereby dictate its terms in various disputes.

Tajikistan has its own arguments in response to all these claims. Tajik experts assert that the Roghun Hydroelectric Power Plant will only benefit Uzbekistan, and that all Uzbek protests are linked to a reluctance to see the Tajik people become less dependent on Uzbekistan. They argue that this opposition is a political move by the Uzbek leadership aimed at preventing the development of Tajikistan. From Dushanbe’s perspective, the Aral Sea crisis is primarily the fault of the downstream countries, which use water resources inefficiently. The problem is further exacerbated, Tajik officials note, by the construction of massive reservoirs in those regions, whose total capacity is one and a half times greater than the current volume of the Aral Sea [13]. The disputes surrounding the Roghun Hydroelectric Power Plant were just one, but a vivid example of the struggle for water resources among the countries of the Central Asian region.

Although in recent years Central Asian countries signed a series of protocols that act as a modern version of the old barter system, the nature of the water crisis has shifted. The question is no longer about how to distribute water effectively, but how it can be conserved sufficiently to withstand the dual pressures of climate change and rapid demographic growth.

Literature Review

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) is implementing the energy-water-land nexus approach in a Consortium, which is led by the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). This is because about a quarter of the working population in Central Asia relies on agriculture as a source of livelihood, but minimal precipitation means that irrigation must be supplied from rivers, which are increasingly being used for energy generation. New hydroelectric power plants built on the Amu Darya and Syr Darya rivers may disrupt water flow to downstream regions that depend on these rivers for crop irrigation, livestock maintenance, and socio-economic development. This highlights that the water crisis is not the isolated problem, but rather forms a “triangle” with energy and food production.

While international organizations promote the nexus approach, scholarly analysis reveals gaps in the adoption of this method. The WEF nexus presents opportunities for policy makers, business leaders, investors, nongovernmental organizations and the public at large to address three mutually-dependent global security concerns (i.e. access to water, sustainable energy and food security). However, several challenges remain for the corresponding research required for sound operationalization of the nexus. These are largely reflected by considerable data and knowledge gaps and lack of systematic analytical tools to apply nexus thinking effectively [8]. Another challenge is identified by I.Abdullaev and Sh.Rakhmatullaev, who argue that hydrocracies (water bureaucracies) are still hesitant to share with other sectors their area of expertise in decision-making power over affairs of water resources management. Moreover, the capacities of the national partners are limited by the sectoral distribution culminating in “egocentrism” [1]. This demonstrates that although the governments acknowledge the need to overcome “water box” problem, some aspects of nexus approach still require further development and reform.

Another group of scholars discusses the benefits of the WEF nexus approach in achieving the SDGs. Poverty eradication is the overarching target of the SDGs with an overall commitment to “free humanity from poverty and hunger as a matter of urgency. Sustained poverty eradication is also a central goal of sustainable livelihoods approaches in recognition that sustainable and fulfilling livelihoods are critical to breaking the poverty cycle. It therefore seems crucial to consider livelihoods more explicitly when presenting a set of global targets to achieve future sustainable development of society as a whole. Water, energy and food security are key focal elements for

reducing poverty by ensuring adequate resources for sustaining and improving livelihoods in equitable ways [4]. The ongoing development and formulation of the Sustainable Development Goals should consider and recognize the importance of a nexus approach to water, energy and food. Doing so will help promote consistency and complementarity among the Sustainable Development Goals. The goals should reflect nexus interactions that can be monitored at different scales to increase the benefits for both humans and nature [2].

Methodology

This study employs the qualitative research design to evaluate the Water-Energy-Food (WEF) nexus approach as a solution for water scarcity in Central Asia. The methodology is divided into three phases. First, a thematic analysis of scholarly literature review will demonstrate the effectiveness of nexus approach to demonstrate its theoretical validity, Second, the study uses the Aral Sea crisis as a case study, by analyzing historical data and academic arguments, it shows the consequences of treating the water problem as an “isolated” one. Finally, the research gathers data from intergovernmental organizations (e.g., World Bank, UNECE) to identify practical techniques for integrated resource management in arid climates.

Findings

The word 'nexus' (derived from the Latin word *nectare*, meaning 'to connect') means an important connection between the parts of a system or a group of things [3]. 'Nexus thinking' was first conceived by the World Economic Forum to promote the inseparable links between the use of resources to provide basic and universal rights to food, water and energy security. Whilst the World Economic Forum presented the nexus framework from a securities perspective (water–energy–food security), subsequent versions have taken on various facets with alternative components, such as water resources as a central component, land use–water–energy and food as a core component with land–water–energy linkages. Nexus thinking is advocated as an advance on current and often sector-specific governance of natural resource use [4].

Apart from the resource-centric nexuses (like Water-Energy-Food), there is also the nexus which aims to stabilize the region after the crisis, during the fragile periods – The Humanitarian - Development-Peace (HDP) nexus. In an attempt to address the causes and effects of crises, international, intergovernmental and non-governmental organizations intervene in such protracted situations, aiming to save lives, alleviate suffering, mitigate risks and pave the way for durable solutions. The Humanitarian-Development-Peace (HDP) nexus is the most recent proposition for a comprehensive response to protracted crises and has been piloted in a variety of contexts, particularly in protracted displacement situations. According to the Development Assistance Committee (DAC) of the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), the nexus aims to strengthen “collaboration, coherence and complementarity” between humanitarian, development and peace interventions “to reduce overall vulnerability and the number of unmet needs, strengthen risk management capacities and address root causes of conflict [11]. This can show that the nexus approach is increasingly being integrated in all spheres of life, recognizing that complex crises cannot be solved by a single sector in isolation.

The Aral Sea case study can serve as an excellent example of the failure to recognize the interconnection between water sustainability and large-scale agriculture. During the Soviet era, the Central Asian Republics (CARs) were ruled under management of centralized Soviet Union. Economically, the region was untapped until Nikita Khrushchev executed the “Virgin Land” policy. The purpose of this policy was to focus on agricultural productivity as a means of economic prosperity [9]. This harmonic balance of water resources changed when the Soviet Union decided to expand irrigation lands for the cultivation of cotton within Central Asian downstream countries (Turkmenistan and Uzbekistan). Soviet planners emphasized on mono-cultural cotton production than crops which fit the climate condition of the region. As a result of irrational irrigation, Aral Sea received less than 1000 km³ of water flow in the last 35 years leading to the sharp decline of water level in the Aral Sea [10]. The Aral Sea and its surroundings have been greatly affected by climate variability and environmental changes which occur at different spatial and temporal scales. There is

a complex connection between climate, hydrology and land-use. Any change in one of these systems will trigger changes in the other. For instance, changes in hydrological patterns and surface coverage of a basin result in changes in temperature and precipitation [7]. Lioubimtseva in her research found another interconnection that was also vital to understand before implementing the “Cotton first” policy.

Conclusion & Discussion

Addressing water scarcity in Central Asia requires a holistic approach that integrates food and energy security, as these sectors are interconnected (see Fig.1). Innovative technologies must be deployed to optimize resource efficiency and mitigate water loss.

Currently, irrigated agriculture consumes approximately 90 percent of all abstracted water in the Aral Sea Basin, where Central Asian countries are located. A combination of high levels of water withdrawals and already limited water resources puts considerable stress on the water supply in the region. If no improvements in productivity of water are achieved, the likely increases in water abstractions and additional water storage in the upstream countries are likely to lead to increased seasonal water shortages in irrigation water supply in downstream countries of the basin, thereby negatively affecting agricultural production and rural livelihoods and intensifying out-migration to urban areas. Modernization of irrigation systems in the region is emerging as a key solution for responding to the challenges in the sector under the changing socioeconomic circumstances. Technological advances and innovations made over the past few decades have resulted in significant improvements in the efficiency of irrigation systems and the quality of their performance. This includes a range of modern technologies that incorporate, among other things: pipe distribution systems combined with pressurized irrigation (drip and sprinkler irrigation), ET-based water management using remote sensing, geographic information systems (GIS), digital and wireless communication of data and information, and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems for canal control [12]. This can demonstrate that further investment on modernizing the irrigation system can lead to the reduction of water waste, thereby gradually solving the problem of water shortages in Central Asia.

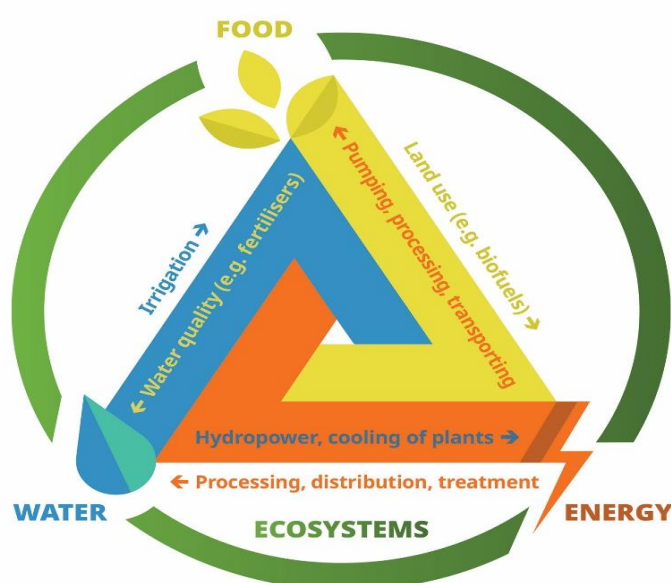


Figure 1. The Nexus approach. Source: Global Water Partnership-Mediterranean (2019) [5].

The reliance on hydropower makes energy systems in Central Asia vulnerable to fluctuations in water availability. This vulnerability is evident in Kyrgyzstan and Tajikistan, where significant fluctuations in annual electricity production are notable and the seasonal variability of hydropower

poses significant challenges to meeting peak demand. These challenges may intensify with an increasing share of hydropower in the energy mix. While large reservoirs can partially mitigate such variability to a certain degree, they lead to environmental and social challenges. To address the remaining dependence on natural water availability, the integration of other non-hydro renewable energy sources, such as solar and wind is essential. Although they have emerged as promising alternatives, their contribution to the region's primary energy supply remains negligible at present [6]. Further research can focus on strategies to expand the integration of non-hydro renewable energy sources, while reducing the heavy reliance on hydropower.

Bibliography

1. Abdullaev, I., Rakhmatullaev, S. Setting up the agenda for water reforms in Central Asia: Does the nexus approach help? *Environ Earth Sci* 75, 870 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5409-8>
2. Bhaduri, A., Ringler, C., Dombrowski, I., Mohtar, R., & Scheumann, W. (2015). Sustainability in the water–energy–food nexus. *Water International*, 40(5–6), 723–732. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1096110>
3. Cambridge Dictionary. Nexus – Cambridge Dictionary. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/nexus>
4. Eloise M. Biggs, Eleanor Bruce, John M.A., ... Stephanie Duce (2015). Sustainable development and water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
5. Global Water Partnership-Mediterranean (2019). Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus. Accessed May 10, 2026. <https://www.gwp.org/en/GWP-Mediterranean/WE-ACT/Programmes-per-theme/Water-Food-Energy-Nexus/the-nexus-approach-an-introduction/>
6. Jan De Keyser, Patricia Osuna Fuentes, Daniel S. Hayes, Helmut Habersack (2026). A review of hydropower in Central Asia: Past, present, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116239>
7. Lioubimtseva, E. (2014). Impact of Climate Change on the Aral Sea and Its Basin. In: Micklin, P., Aladin, N., Plotnikov, I. (eds) *The Aral Sea*. Springer Earth System Sciences, vol 10178. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02356-9_17
8. Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A. K., Hoff, H., Lawford, R., ... Zheng, C. (2017). Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus. *Hydrological Sciences Journal*, 62(11), 1714–1720. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1353695>
9. Loodin, N. (2020). Aral Sea: an environmental disaster in twentieth century in Central Asia. *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 2495–2503. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00837-3>
10. Micklin, P. P. (1985). The Vast Diversion of Soviet Rivers. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 27(2), 12–45. <https://doi.org/10.1080/00139157.1985.9933449>
11. Organisation for Economic Co-operation and Development (2022). The Humanitarian-Development-Peace Nexus Interim Progress Review. https://www.oecd.org/en/publications/the-humanitarian-development-peace-nexus-interim-progress-review_2f620ca5-en.html
12. World Bank (2018). Modernizing Irrigation in Central Asia. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/416661615193282545/pdf/Modernizing-Irrigation-in-Central-Asia.pdf>
13. Y. Borisova (2019). Tajikistan – Uzbekistan: The Struggle for Water Resources. <https://cyberleninka.ru/article/n/tadzhikistan-uzbekistan-borba-za-vodnye-resursy/viewer>

[DOI 10.5281/zenodo.20232022](https://doi.org/10.5281/zenodo.20232022)

NASOS STANSIYALAR ISHINI OPTIMAL BOSHQARISH MASALASINI CHEKLI AYIRMALAR USULI BILAN YECHISH

M.N. Esonturdiyev¹

¹Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O'zbekiston

esonturdiyev80@mail.ru

Annotatsiya. Maqola, nasos stansiyalarining ishini optimal boshqarish masalasi haqida bo'lib, ayniqsa, energetika sarfini minimallashtirish nuqtai nazaridan, chekli ayirmalar usuli orqali yechishga oid metodik yondashuv taqdim etilgan. Maqsad – suv ta'minoti tizimlarini samarali boshqarish uchun nasos stansiyalarining optimal ish rejimlarini tanlash va energiya sarfini kamaytirish hisoblanadi. Hamda maqolada nasos stansiyalari ishini optimal boshqarish masalasining matematik modeli ishlab chiqilganligi, suv sathi o'zgarishi chekli ayirmalar usuli asosida diskretlashtirilib energiya sarfini kamaytirishga qaratilgan maqsad funksiyasi shakllantirilganligi keltirilgan. Shuningdek, modelda nasoslarning maksimal suv uzatish imkoniyati, rezervuardagi suv sathining minimal va maksimal chegaralari, iste'molchilar talabi hamda nasoslarning ish rejimiga oid cheklovlar hisobga olinganligi maqolada ta'kidlab o'tilgan.

Kalit so'zlar: Nasos stansiyalari, optimal boshqaruv, chekli ayirmalar usuli, energiya sarfi, suv sathi, diskret optimallashtirish.

Kirish. Hozirgi kunda suv resurslaridan oqilona foydalanish, irrigatsiya tizimlarining samaradorligini oshirish hamda elektr energiyasi sarfini kamaytirish qishloq xo'jaligi va suv xo'jaligi sohaslarining dolzarb masalalaridan biri hisoblanadi. Ayniqsa, sug'oriladigan yerlar ulushi yuqori bo'lgan hududlarda suvni belgilangan vaqtda, kerakli miqdorda va zarur bosimda yetkazib berish nasos stansiyalarining barqaror va samarali ishlashiga bevosita bog'liqdir. Nasos stansiyalarida elektr energiyasi iste'moli katta ulushni tashkil etgani sababli ularning ish rejimini optimal boshqarish iqtisodiy va texnik jihatdan muhim ahamiyat kasb etadi.

Nasos stansiyalarining an'anaviy boshqaruv usullarida ko'pincha nasos agregatlari oldindan belgilangan jadval asosida yoki operator tajribasiga tayangan holda ishga tushiriladi va to'xtatiladi. Bunday yondashuv har doim ham suv talabining vaqt bo'yicha o'zgarishini, rezervuar yoki kanal tizimidagi suv sathini, elektr energiyasi tariflaridagi farqlarni hamda nasoslarning texnik imkoniyatlarini to'liq hisobga olmaydi. Natijada ortiqcha energiya sarfi, suvning samarasiz taqsimlanishi, nasos uskunalarning tez eskirishi va ekspluatatsion xarajatlarning oshishi kuzatilishi mumkin.

Shu sababli nasos stansiyalarining ishini matematik modellashtirish va optimal boshqarish usullari asosida tashkil etish zarurati ortib bormoqda. Optimal boshqaruv masalasida asosiy maqsad - iste'molchilar talabini qondirgan holda nasos agregatlarining energiya sarfini minimallashtirish, tizimdagi suv sathi va bosim ko'rsatkichlarini ruxsat etilgan chegaralarda saqlash hamda nasoslarning ish rejimini texnik jihatdan maqbul holatda tanlashdan iboratdir. Bunda suv balansi, nasoslarning unumdorligi, elektr energiyasi narxi, rezervuar hajmi, suv iste'moli grafigi va boshqa omillar o'zaro bog'liq holda qaraladi.

Mazkur masalani yechishda chekli ayirmalar usuli samarali sonli yondashuvlardan biri sifatida qo'llanilishi mumkin. Ushbu usul yordamida nasos stansiyasi ishini ifodalovchi differensial tenglamalar vaqt bo'yicha diskret ko'rinishga keltiriladi. Natijada uzluksiz boshqaruv jarayoni alohida vaqt bosqichlarida tahlil qilinadi va har bir bosqich uchun nasoslarning ish holati, suv sarfi, suv sathi hamda energiya xarajatlari aniqlanadi. Bu esa murakkab gidravlik va energetik jarayonlarni kompyuter yordamida hisoblash, taqqoslash va optimal yechimni tanlash imkonini beradi [1,3].

Asosiy qism.

Masalaning qo'yilishi: Sug'orish tizimlarining samaradorligini oshirish, energiya resurslarini tejash va resurslardan oqilona foydalanish muhimligini inobatga olib, suv ta'minoti va energetika sohalarida qo'llanilishi mumkin. Energiya narxлари va suv talabining o'zgaruvchanligi davrida ushbu yondashuvlar iqtisodiy jihatdan muhim ahamiyatga ega bo'ladi bu esa mavzuning dolzarbligini bildiradi. Shu munosabat bilan nasos stansiyasining ishini optimal boshqarish asosan minimal elektr energiya sarfi bilan iste'molchilarga zarur suv bosimi va suv hajmini yetkazib berishdan iborat.

Asosiy masalalar:

1. *Nasos stansiyalarining boshqaruvi:* Suv ta'minoti tizimlarida nasoslar yordamida suv sathi va bosimning doimiy ravishda nazorat qilinishi zarur. Nasoslar soni va ish holati vaqt davomida o'zgariishi mumkin. Bu holatni optimal ravishda boshqarish uchun matematik model ishlab chiqiladi.
2. *Chekli ayirmalar usuli:* Uzlüksiz vaqt davomida bo'lib turadigan boshqaruv masalasi, vaqtni diskretlashtirish orqali **chekli ayirmalar usuli** yordamida yechiladi. Vaqt oralig'i diskret bosqichlarga bo'linadi, suv sathining hosilasi chekli ayirma bilan ifodalanadi va shu orqali boshqaruv parametrlarini hisoblash uchun algebraik tenglamalar tuziladi.
3. *Energiya sarfini minimallashtirish:* Maqsadli funktsiya sifatida **energiya xarajatlari** olinadi. Elektr energiyasining sarfini kamaytirish uchun, nasoslarning ish rejimlari optimal tarzda tanlanadi. Maqolada energiya tariflari o'zgarishini inobatga olish, nasoslarni tez-tez yoqib-o'chirishning mexanik eskirishga olib kelishini hisobga olish zarurligi ta'kidlanadi.
4. *Diskret masala va cheklovlar:* Har bir vaqt bosqichida nasoslarning holatini aniqlash, suv sathi va bosim cheklovlari, talabni ta'minlash uchun suyuqlik oqimini hisoblashga qaratilgan. Suv sathining minimal va maksimal chegaralari, nasosning maksimal chiqish quvvati va energiya sarfi bo'yicha cheklovlar qo'yiladi.
5. *Matematik modellar va yechimlar:* Nasos stansiyasining ishini optimallashtirish uchun matematik modeldan foydalaniladi, u quyidagi shartlarni hisobga oladi: suv sathi cheklovlari, nasoslarning ish rejimlari va energiya sarfi. Chekli ayirmalar usuli yordamida bu model diskretizatsiya qilinadi va optimallashtiriladi [9,10].

Optimal boshqaruv masalasida boshqaruv o'zgaruvchisi quyidagicha yoziladi:

$$u_i(t) \quad (1)$$

bu yerda:

$$u_i(t) = \begin{cases} 1, & i - \text{agregat ishlaydi} \\ 0, & i - \text{agregat ishlamaydi} \end{cases}$$

Agar nasos tezligi rostlanadigan bo'lsa:

$$0 \leq u_i(t) \leq 1$$

deb olinadi.

Dinamik model. Rezervuardagi suv balansi quyidagicha yoziladi:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{S} \left(\sum_{i=1}^m Q_i(t) - D(t) \right) \quad (2)$$

bu yerda $h(t)$ -suv sathi, $Q_i(t)$ - i -agregat uzatayotgan suv sarfi, $D(t)$ - iste'molchilar talabi, S - rezervuar yuzasi, T -boshqaruv davri [10].

Bu tenglama shuni bildiradi:

- agar agregatlar uzatayotgan suv miqdori talabdan katta bo'lsa, suv sathi oshadi;
- agar talab katta bo'lsa, suv sathi pasayadi.

Maqsad funktsiya - Optimal boshqaruvning asosiy maqsadi elektr energiya sarfini kamaytirishdir:

$$J = \int_0^T C(t) \sum_{i=1}^m P_i(t) dt \rightarrow \min \quad (3)$$

bu yerda J - umumiy xarajat, $C(t)$ -elektr energiya ta'rifi, $P_i(t)$ -i-nasosning quvvati, m - nasoslar soni [6,10].

Nasos quvvati odatda quyidagicha hisoblanadi:

$$P_i(t) = \frac{\rho g Q_i(t) H_i(t)}{\eta_i}$$

bu yerda ρ - suv zichligi, g - erkin tushish tezlanishi, $Q_i(t)$ - suv sarfi, $H_i(t)$ - nasos bosimi, η_i - foydali ish koeffitsiyenti [5].

Demak, (3) maqsad funksiyasini quyidagicha yozib olamiz:

$$J = \int_0^T C(t) \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_i(t) H_i(t)}{\eta_i} dt \rightarrow \min \quad (3^*)$$

Optimal boshqaruv masalasida faqat energiyani kamaytirish emas. Suv ta'minoti ham barqaror bo'lishi kerak. Shuning uchun quyidagi cheklovlar qo'yiladi:

1. Suv sathi bo'yicha cheklov - $h_{\min} \leq h(t) \leq h_{\max}$
2. Nasos quvvati bo'yicha cheklov - $0 \leq Q_i(t) \leq Q_{i,\max}$
3. Iste'molchilar talabi bajarilishi - $\sum_{i=1}^m Q_i(t) + Q_{res}(t) \geq D(t)$
4. Bosim cheklovi - $H_{\min} \leq H(t) \leq H_{\max}$

Chekli ayirmalar usuliga o'tish. Vaqt oralig'i $[0, T]$ teng qismlarga bo'linadi:

$$t_k = k\Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N$$

bu yerda

$$\Delta = \frac{T}{N}$$

Suv sathining hosilasi chekli ayirma bilan almashtiriladi:

$$\frac{dh(t)}{dt} \approx \frac{h_{k+1} - h_k}{\Delta t}$$

Shunda dinamik tenglama quyidagicha bo'ladi:

$$\frac{h_{k+1} - h_k}{\Delta t} = \frac{1}{S} \left(\sum_{i=1}^m Q_{i,k} - D_k \right)$$

bundan

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{S} \left(\sum_{i=1}^m Q_{i,k} - D_k \right) \quad (4)$$

kelib chiqadi. (4) tenglama chekli ayirmalar usulidagi asosiy diskret model hisoblanadi [10].

Diskret maqsad funksiyasi uzluksiz integral yig'indi bilan almashtiriladi:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta t \cdot C_k \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_{i,k} H_{i,k}}{\eta_i} \rightarrow \min \quad (5)$$

Agar nasoslarni tez-tez yoqib-o'chirish zararli deb hisoblansa, qo'shimcha had kiritiladi:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta t \cdot C_k \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_{i,k} H_{i,k}}{\eta_i} + \lambda \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^m |u_{i,k} - u_{i,k-1}| \rightarrow \min \quad (6)$$

bu yerda λ -nasosni yoqib-o'chirish jarimasini bildiradi. Bu juda muhim hisoblanadi, chunki faqat energiyani minimallashtirishga qaralsa, model nasoslarni juda ko'p marta yoqib-o'chirishi mumkin. Amaliyotda bu mexanik eskirishga olib keladi [11, 12].

Yakuniy diskret masala quyidagicha yoziladi:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta t \cdot C_k \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_{i,k} H_{i,k}}{\eta_i} \rightarrow \min \quad (7)$$

quyidagi shartlar ostida:

$$\begin{aligned}
 h_{k+1} &= h_k + \frac{\Delta t}{S} \left(\sum_{i=1}^m Q_{i,k} - D_k \right) \\
 h_{\min} &\leq h_k \leq h_{\max} \\
 0 &\leq Q_{i,k} \leq Q_{i,\max} \\
 u_{i,k} &\in \{0,1\} \\
 Q_{i,k} &= 0, \text{ agar } u_{i,k} = 0 \\
 Q_{i,k} &> 0, \text{ agar } u_{i,k} = 1
 \end{aligned}$$

Bu masala aralash-butun sonli optimallashtirish masalasiga aylanadi [1, 13].

Masalani yechish algoritmini quyidagicha yozish mumkin:

1-bosqich. Boshlang'ich ma'lumotlarni kiritish

Berilgan:

- nasoslar soni;
- har bir nasosning maksimal sarfi;
- har bir nasosning FIK qiymati;
- rezervuar yuzasi;
- boshlang'ich suv sathi;
- minimal va maksimal suv sathi;
- har soatdagi suv talabi;
- har soatdagi elektr energiya tarifi.

2-bosqich. Vaqtni diskretlash

Masalan, 24 soatlik davr olinadi:

$$T = 24$$

Agar har 1 soat uchun hisob qilinsa:

$$\Delta t = 1$$

$$N = 24$$

3-bosqich. Suv sathini hisoblash

Har bir vaqt bosqichida:

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{S} \left(\sum Q_{i,k} - D_k \right)$$

4-bosqich. Barcha mumkin bo'lgan nasos rejimlarini tekshirish

Masalan, 3 ta agregat bo'lsa, har bir soatda quyidagi variantlar bor:

$$(0,0,0), (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (1,1,0), \dots, (1,1,1)$$

Har bir kombinatsiya uchun:

- suv yetarlimi;
- sath me'yordami;
- bosim yetarlimi;
- xarajat qancha;

tekshiriladi.

5-bosqich. Eng optimal rejim tanlanadi

Shartlarni buzmagun holda eng kichik qiymatli J tanlanadi.

Misol: Faraz qilaylik

- bitta rezervuar bor;
- 2 ta agregat mavjud;
- har bir agregat soatiga $100 m^3 / soat$ uzatadi;
- rezervuar yuzasi $S = 500 m^2$;

- boshlang'ich suv sathi $h_0 = 5m$;
- ruxsat etilgan sath:

$$3 \leq h_k \leq 8$$

- vaqt oralig'i:

$$\Delta t = 1 \text{ soat}$$

- iste'mol talabi:

$$D_k = 150 \text{ m}^3 / \text{soat}$$

Agar faqat bitta agregat ishlasa:

$$Q = 100$$

$$h_{k+1} = h_k + \frac{1}{500}(100 - 150)$$

$$h_{k+1} = h_k - 0,1$$

Demak, suv sathi har soatda 0.1 metrga kamayadi.

Agar ikkita nasos ishlasa:

$$Q = 200$$

$$h_{k+1} = h_k + \frac{1}{500}(200 - 150)$$

$$h_{k+1} = h_k + 0,1$$

Demak, suv sathi har soatda 0.1 metrga oshadi.

Optimal boshqaruv shundan iborat bo'ladi:

- arzon elektr tarifi vaqtida ikki nasosni ishlatib, rezervuarni to'ldirish;
- qimmat tarif vaqtida bitta nasos yoki umuman nasossiz ishlash;
- lekin suv sathi $3m$ dan pastga tushmasligi kerak.

XULOSA

Nasos stansiyalarining ishini optimal boshqarish masalasi avval differensial tenglamalar tizimi orqali modellashirildi. So'ngra vaqt bo'yicha diskretlash amalga oshirilib, hosilalar chekli ayirmalar bilan almashtirildi. Ya'ni Nasos stansiyalar ishini optimal boshqarish masalasi chekli ayirmalar usuli yordamida uzluksiz optimal boshqaruv masalasidan diskret optimallashtirish masalasiga keltiriladi. Bunda vaqt oralig'i chekli bosqichlarga bo'linadi, suv sathining hosilasi chekli ayirma orqali ifodalanadi va rezervuardagi suv balansi algebraik rekurrent tenglama ko'rinishida yoziladi. Natijada optimal boshqarish uchun har bir vaqt bosqichida nasoslarning yoqilgan yoki o'chirilgan holati, suv sarfi, energiya xarajati, rezervuar sathi hisoblanadi va nasoslarning ish rejimini tanlash orqali umumiy energiya xarajatini minimallashtirishga erishiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Seytov A.J. *Mathematical models and optimal control algorithms for channels of irrigation systems taking into account the discreteness of water supply*. 2021.
2. Negenborn R.R., van Overloop P.J., Keviczky T., De Schutter B. Distributed model predictive control of irrigation canals.
3. Kong L. et al. A model predictive water-level difference control method for automatic control of irrigation canals. *Water*, 2019.
4. Jia W. et al. Intelligent control technology and system of on-demand irrigation based on multiobjective optimization. *Agronomy*, 2023.
5. Эсонтурдиев, М. Н. (2023). Algorithms for Clarification of the Operating Modes of Channel Sections in the Management of Water Resources in Channel Irrigation Systems. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 44(3), 121-129.

6. Smith G.D. *Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*. Oxford University Press.
7. Seytov, A., et al. "Numerical implementation of optimal water resource management problems in open channels using Python." *Uzbek Mathematical Journal*. 2025. Том 1, Номер 69, Страницы 133-140, Издатель uzmj.2025-1-13.
8. Strikwerda J.C. *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*. SIAM.
9. LeVeque R.J. *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*. SIAM.
10. Morton K.W., Mayers D.F. *Numerical Solution of Partial Differential Equations*. Cambridge University Press.
11. Quarteroni A., Sacco R., Saleri F. *Numerical Mathematics*. Springer.
12. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*.
13. Kirk D.E. *Optimal Control Theory: An Introduction*. Dover Publications.
14. Bryson A.E., Ho Y.C. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Taylor & Francis.
15. Bertsekas D.P. *Dynamic Programming and Optimal Control*. Athena Scientific.
16. Chow V.T. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
17. Chaudhry M.H. *Open-Channel Flow*. Springer.
18. Karassik I.J., Messina J.P., Cooper P., Heald C.C. *Pump Handbook*. McGraw-Hill.
19. Walski T.M. et al. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press.

[DOI 10.5281/zenodo.20232176](https://doi.org/10.5281/zenodo.20232176)

Markaziy Osiyo davlatlarida suvi resurslarini optimal boshqarishning nazariy asoslari, yondashuvlari va modellari

M.N. Esonturdiyev¹, Z.Y. Abdurahimov²

¹ Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O'zbekiston

² Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O'zbekiston

e-mail: esonturdiyev80@mail.ru¹, zulfiqorabdurahimov83@gmail.com²

Annotatsiya. Ushbu maqola global ekologik va iqtisodiy muammolar sharoitida suv resurslarini optimal boshqarishning nazariy va amaliy jihatlarini o'rganishga bag'ishlangan. Maqolada suv resurslarini boshqarishning integratsiyalashgan yondashuvining asosiy prinsiplari ko'rib chiqilgan, bu esa suvdan oqilona, iqtisodiy jihatdan samarali va ekologik barqaror foydalanishni ta'minlashga qaratilgan. Suv sohasining raqamlashtirilishi, avtomatlashtirilgan sug'orish tizimlarini joriy etish va suvni tejovchi texnologiyalarni qo'llash masalalariga alohida e'tibor qaratilgan.

Maqolada O'zbekiston va Markaziy Osiyo mamlakatlarining tajribasi tahlil qilingan bo'lib, suvdan samarali foydalanishni oshirish maqsadida sohani rivojlantirish bo'yicha islohotlar amalga oshirilayotganligi, hamda ilmiy yondashuvlar, huquqiy mexanizmlar va xalqaro hamkorlikni birlashtirish zarurliklari maqolada ta'kidlab o'tilgan, bular barqaror suv balansini ta'minlashda muhim omil bo'ladi. Suv resurslarini optimal boshqarishda regionning barqaror rivojlanishi asosiy omili ekanligi xulosa qismida aytib o'tilgan.

Kalit so'zlar: suv resurslari, optimal boshqarish, barqaror rivojlanish, suv siyosati, suv sohasining raqamlashtirilishi, innovatsion texnologiyalar, sug'orish tizimlari, iqtisodiy tartibga solish mexanizmlari, davlatlararo hamkorlik, transchegaraviy suv resurslari, gidro-iqtisodiy samaradorlik.

Kirish. Suv-inson hayoti, iqtisodiy rivojlanish va ekologik muvozanatni ta'minlashda muhim tabiiy resursdir. Iqlim o'zgarishlari, urbanizatsiya va aholi sonining o'sishi sharoitida suv resurslaridan oqilona va barqaror foydalanish masalasi dunyoning barcha mamlakatlari uchun strategik ahamiyatga ega. Chuchuk suvning cheklanganligi, uning notekis taqsimlanishi va suv ekotizimlariga ortib borayotgan bosim yangi boshqaruv yondashuvlarini ishlab chiqishni talab qiladi.

Hozirgi kunda suv resurslarini boshqarish konsepsiyasi integratsiyalashgan suv resurslarini boshqarish prinsiplari asosida qurilgan bo'lib, bu prinsiplar jamiyatning ijtimoiy, iqtisodiy va ekologik manfaatlari o'rtasidagi muvozanatni ta'minlashni nazarda tutadi. Shu bilan birga, innovatsion texnologiyalarni joriy etishga, suvni hisobga olish va taqsimlash jarayonlarini raqamlashtirishga hamda huquqiy va institutsional boshqaruv mexanizmlarini rivojlantirishga alohida e'tibor qaratiladi [1].

Markaziy Osiyo davlatlari, jumladan, O'zbekistan uchun suvdan samarali foydalanish masalasi ayniqsa dolzarbdir. Suv resurslarining cheklanganligi, transchegaraviy daryolarga bog'liqlik va qishloq xo'jaligida suv iste'moli darajasining yuqoriligi optimal boshqaruv modellari yaratishni zarur qiladi. Suv boshqaruvining nazariy asoslari va amaliy yondashuvlarini o'rganish suv xo'jaligi tizimining samaradorligini oshirish va regionning barqaror rivojlanishini ta'minlash uchun strategik yo'nalishlarni aniqlash imkonini beradi [2].

I. Suv resurslarini boshqarishning nazariy asoslari.

Suv resurslarini boshqarish (SRB) - bu suv resurslaridan oqilona foydalanish, ularni himoya qilish va tiklashga qaratilgan tashkilot, iqtisodiy, texnik va huquqiy choralar majmui hisoblanadi. Optimal boshqaruv nazariyasi barqaror rivojlanish, Integratsiyalashgan suv resurslarini boshqarish va ekosistemaga asoslangan yondashuv prinsiplari asosida qurilgan [3,4].

Suv resurslarini samarali boshqarishning asosiy prinsiplari quyidagilarni o'z ichiga oladi:

Murakkablik - suv, yer va energiya resurslari o'rtasidagi bog'liqlikni inobatga olish;

Muvozanat - barcha sohalarning ehtiyojlarini qondirish va ekologik barqarorlikni saqlash;

Iqtisodiy samaradorlik - minimal xarajatlar bilan eng yuqori daromad olish;

Ijtimoiy adolat - barcha ijtimoiy guruhlariga suvga teng va adolatli kirishni ta'minlash;

Innovatsiya - yangi texnologiyalar va metodlarni joriy etish, suvni hisoblash, taqsimlash va monitoring qilish.

Shunday qilib, suv resurslarini optimal boshqarish iqtisodiyot, gidrologiya, ekologiya va axborot texnologiyalarini o'z ichiga olgan ko'p sohalarni qamrab olgan yondashuvni talab qiladi.

II. Suv sohasidagi global muammolar.

Hozirgi kunda dunyoning 2 milliarddan ortiq aholisi chuchuk suv tanqisligiga duch kelmoqda. Buning asosiy sabablari - iqlim o'zgarishi, demografik o'sish va sanoatlashuv. Suv nafaqat tabiiy, balki siyosiy resursga ham aylanmoqda.

Suv sohasidagi asosiy global muammolar quyidagilardan iborat:

- Suv resurslarining mintaqalar bo'yicha notekis taqsimlanishi;
- Yuzaki va yer osti suvlarining ifloslanishi;
- Suv ta'minoti infratuzilmasining eskirishi;
- Suvdan samarali foydalanilmasligi;
- Institutsional boshqaruvning zaifligi va moliyaviy cheklovlar.

Bu omillar natijasida oziq-ovqat va energiya xavfsizligi uchun tahdidlar yuzaga kelmoqda. BMT va Jahon banki kabi xalqaro tashkilotlar «integratsiyalashgan suv resurslarini boshqarish»ga o'tish zarurligini ta'kidlamogda [2].

III. Optimal boshqarishning usul va texnologiyalari.

So'nggi yillarda suvdan samarali foydalanishni oshirishga qaratilgan texnologiyalar faol rivojlanmoqda. Ulardan ba'zilar quyidagilar:

1. *Suv sohasining raqamlashtirilishi.* Axborot tizimlari (GIS, IoT, Big Data) yordamida suv resurslari darajasi real vaqtda nazorat qilinadi, suv tanqisligi prognoz qilinadi va suv ta'minoti boshqariladi [7].
2. *Iqtisodiy tartibga solish.* Suvning haqiqiy qiymatini aks ettiruvchi tariflar joriy etish suvdan oqilona foydalanishni rag'batlantiradi. «Foydalanuvchi to'laydi» prinsipi suv siyosatining muhim tarkibiy qismiga aylanadi.
3. *Samarali qishloq xo'jaligi sug'orish tizimlari.* Tomchilab sug'orish va nuqtaviy sug'orish usullarini qo'llash suvni 30 - 40% gacha tejashga imkon beradi.
4. *Suvni tozalash va qayta ishlatish.* Bir qator mamlakatlarda sanoat va qishloq xo'jaligida suvni qayta ishlatish amaliyoti muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda.
5. *Prognozlashtirish modellari.* Hidrologik modellar suv resurslari balansini baholash va ularni taqsimlash strategiyalarini ishlab chiqish imkonini beradi.

Yuqoridagi usullarni joriy etish davlat, ilmiy markazlar va xususiy sektor o'rtasida yaqin hamkorlikni talab qiladi.

IV. O'zbekistondagi va Markaziy Osiyo davlatlaridagi tajriba.

O'zbekiston va Markaziy Osiyo mamlakatlari cheklangan suv resurslariga ega hududlar hisoblanadi. Suv resurslarining asosiy qismi mamlakatdan tashqarida shakllanadi, bu esa Amudaryo va Sirdaryo kabi transchegaraviy daryolarga bog'liqlikni yaratadi.

O'zbekiston suv xo'jaligi vazirligi ma'lumotlariga ko'ra, suv iste'molining 85% dan ortig'i qishloq xo'jaligiga tegishlidir. Bu esa samarali sug'orish tizimlarini joriy etish, avtomatlashtirish va suv ta'minotini monitoring qilish zaruratini keltirib chiqaradi [3].

So'nggi yillarda mamlakatda quyidagi islohotlar amalga oshirilmoqda:

- Avtomatlashtirilgan sug'orish tizimlarini yaratish (SCADA);
- «Foydalanuvchi to'laydi» prinsipiga asoslangan suvdan foydalanish tizimiga o'tish;
- Suvdan foydalanish tashkilotlarini rivojlantirish (SUT);
- Xalqaro tashkilotlar (FAO, GIZ, ADB) bilan suv resurslarini boshqarish bo'yicha hamkorlik.

Qozog'iston va Qirg'iziston tajribasi ham transchegaraviy daryolar havzalaridagi davlatlararo hamkorlikning ahamiyatini ko'rsatadi, bu yerda umumiy suv balansini shakllantirish amalga oshiriladi [5].

V. Rivojlantirish va tavsiyalar

Suv resurslarini optimal boshqarish uchun iqtisodiy, huquqiy va texnologik mexanizmlarning uyg'unlashuvi zarur. Asosiy tavsiyalar quyidagilardan iborat [6]:

- Integratsiyalashgan Suv Resurslarini Boshqarish prinsiplari asosida milliy suv siyosatini takomillashtirish;

- Suvdan foydalanishning hisobini yuritish va tahlil qilish uchun raqamli platformalarni joriy etish;
- Qishloq xo'jaligida suvni tejovchi texnologiyalarni rivojlantirish;
- Suv diplomatiyasida xalqaro hamkorlikni kuchaytirish;
- Suv xo'jaligi mutaxassislarining malakasini oshirish;
- Suv ta'minoti va suvni tozalash bo'yicha xususiy sektorlarni investitsiya loyihalariga jalb etish.

Alohida e'tibor berish kerakki, aholining suvga bo'lgan madaniyatini shakllantirish - suvni strategik resurs sifatida muhofaza qilish va tejashga bo'lgan mas'uliyatni oshirish zarur.

O'zbekiston va Markaziy Osiyo mamlakatlari uchun davlat siyosatining ayniqsa muhim yo'nalishi - suv xo'jaligi sohasida tizimli islohotlarni davom ettirish bo'lib, bu xalqaro tajribani integratsiya qilish, innovatsion texnologiyalarni joriy etish va ilmiy ishlanmalardan faol foydalanishga asoslanadi. Hozirgi sharoitda mintaqaning suv sektori bir qator muammolar bilan duch kelmoqda - bu transchegaraviy suv resurslari va iqlim o'zgarishlari bilan bog'liq muammolar, shuningdek, samarali taqsimot va infratuzilmaning eskirishi, bu esa yangi boshqaruv modellari zarurligini talab qiladi. Ushbu yangi boshqaruv modellari barqaror rivojlanish va suvdan oqilona foydalanish prinsiplariga asoslanishi kerak [4].

VI. Markaziy Osiyodagi suv resurslarining statistik ma'lumotlari.

Markaziy Osiyodagi umumiy suv resurslari hajmi:

- Markaziy Osiyodagi yillik umumiy suv resurslari hajmi taxminan 116 km³ ni tashkil etadi, ulardan taxminan 90% Amudaryo va Sirdaryo daryolari orqali shakllanadi.

Taqsimot va iste'mol:

- O'zbekistonda ichki suv resurslarining taxminan 20% ichki manbalardan olinadi, 80% esa tashqi manbalardan (asosan Amudaryo va Sirdaryo daryolaridan) keladi.
- Mintaqaviy darajada suv resurslarining katta qismi (80%) qishloq xo'jaligida sarflanadi.

Iqlim va suv darajasi tendensiyalari:

- O'zbekiston va Markaziy Osiyo mintaqasi qurg'oqchil hududlar hisoblanadi, yil davomida yog'ingarchilik darajasi past bo'lib, bu suv tanqisligi muammosini kuchaytiradi. Sirdaryo va Zarafshon daryolaridagi suv darajasi pasayishi tendentsiyasi kuzatilmoqda.

Rasmiy statistika manbalari:

- O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligining statistik ma'lumotlar portalida suv taqsimoti, suv oqimlari va iste'mol ko'rsatkichlari haqida rasmiy ma'lumotlarni topish mumkin.

VII. Markaziy Osiyodagi suv resurslarining optimal modellari.

Suv resurslarini matematik modellashirish - kelajakdagi suv tanqisligini oldindan bashorat qilish va boshqaruv qarorlarini qabul qilishda ilmiy asosni ta'minlovchi muhim vosita hisoblanadi. Matematik modellashirish bir necha asosiy yo'nalishga bo'linadi.

Deterministik modellar. Suv balansining asosiy tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{ds}{dt} = P(t) - E(t) - Q(t) - W(t)$$

bu yerda S -suv ombori hajmi (m³), $P(t)$ -yog'ingarchilik intensivligi (m³/kun), $E(t)$ - bug'lanish intensivligi (m³/kun), $Q(t)$ - oqib chiqish (m³/kun), $W(t)$ - inson tomonidan iste'mol (m³/kun).

Ushbu tenglama matematik amal ko'rinishida oddiy bo'lsada, uning har bir parametrini hududiy masshtabda aniq o'lchash va hisoblash murakkab vazifa hisoblanadi.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli Arnold boshchiligida (1998) ishlab chiqilgan bo'lib, hozirgi kunda Markaziy Osiyo havzalarida keng qo'llanilmoqda. SWAT modeli yog'ingarchilik, bug'lanish, tuproq namligi, o'simlik transpiratsiyasi, yerosti suv oqimi va gidrodinamik jarayonlarni birga hisobga oluvchi fizikaviy asosli model bo'lib, u 2–3 haftalik oqim prognozlarini yuqori darajada aniq hisoblayapti. O'zbekistondagi Zarafshon daryosi havzasida o'tkazilgan sinovlarda SWAT modeli Nash-Sutcliffe samaradorligi (NSE) 0,72–0,84 oralig'ida bo'ldi, bu yaxshi bashorat sifatini ko'rsatadi (Tursunov et al., 2021).

Markov zanjirlarini qo'llash asosida qurilgan stoxastik gidrologik modellar yog'ingarchilik tartibsizligini va uning taqsimot xususiyatlarini yaxshiroq aks ettiradi. Monte-Karlo usuli bilan 10,000 ta ssenariyni simulyatsiya qilish orqali suv tanqisligi ehtimolini hisoblash mumkin. Markaziy Osiyo havzalari uchun qurilgan stoxastik modellarda yog'ingarchilikni gamma-taqsimot, haroratni esa ARIMA modeli bilan ifodalash orqali eng maqbul natijalar olinyapti (Siegfried et al., 2012).

Ko'p agentli modellar (ABM — Agent-Based Models). Murakkab ijtimoiy-ekologik tizimlarni modellashtirish uchun ishlatiluvchi bu yondashuv Markaziy Osiyo suv boshqaruvida tobora keng qo'llanilmoqda. ABMda fermerlar, sug'orish uyushmalari, gidroelektrostansiyalar va tabiat ob'ektlari "agent" sifatida ifodalanadi. WAMAM (Water Management Agent Model for Amu Darya region) modeli Gain va Giupponi (2015) tomonidan ishlab chiqilgan bo'lib, mintaqadagi suv taqsimoti jarayonlarini 30 yil davomida simulyatsiya qila oladi.

Bellman qoidasi asosida qurilgan optimal boshqaruv modeli quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$V(S) = \max\{R(S, u) + \beta \cdot V(S_{t+1})\}$$

bu yerda V - optimal qiymat funksiyasi, R - joriy davr foydasi (sug'orish foydalari minus toshqin zararlari), β - diskontlash omili, u - boshqaruv qarorlari (suv havzasidan chiqarilayotgan suv miqdori). Ushbu model Toktogul suv omborini (Qirg'iziston) optimal boshqarishda qo'llanilgan va natijalar yillik iqtisodiy samara 120–180 million AQSh dollarini tashkil etishi mumkinligini ko'rsatgan (Granit et al., 2012).

O'zbekistondagi optimizatsiya modellari va ularning qo'llanilishi
ITSP (Inexact Two-Stage Stochastic Programming) optimizatsiya modeli:

- Ushbu model Amudaryo havzasidagi suv resurslarini taqsimlash uchun qo'llaniladigan muhim amaliy misol hisoblanadi.

Modelning maqsadi:

- Suv resurslari cheklangan sharoitda iqtisodiy foydani maksimal darajaga chiqarish.
- Turli oqim sharoitlarida suv taqsimotini optimallashtirish.

Modelning elementlari:

1. Suv ta'minoti va suv talabini tahlil qilish.
2. Turli sektorlar (qishloq xo'jaligi, sanoat, aholi, ekologiya)da suv iste'molining o'rni.
3. Iqtisodiy foyda va jarima koeffitsiyentlari.
4. Turli ssenariylar asosida suvning optimal taqsimoti.

Model natijalari – optimizatsiyaning samaradorligi:

- Modeldan foydalanilgandan so'ng umumiy suv iste'moli kamaydi, iqtisodiy foyda esa oshdi. Masalan, suv oqimlari yuqori bo'lganda, optimallashtirilgan sharoitda umumiy suv miqdori kamaydi, lekin iqtisodiy foyda oshdi.

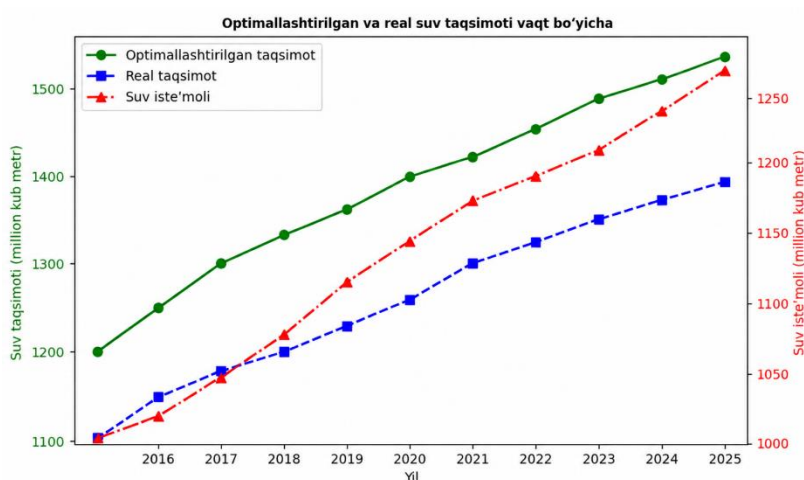
Suv resurslarini saqlash va boshqarish:

- O'zbekistonda suv tanqisligi qurg'oqchilik sharoitlari, iqtisodiy o'sish va aholi sonining oshishi sababli kuchaymoqda.
- Suv resurslarini boshqarish strategiyasini isloh qilish boshlandi, shu jumladan axborot-analitik resurslar markazini yaratish va suv resurslarini boshqarish bo'yicha bo'limlarni tashkil etish [6].

Tizim tavsifi:

- Boshqaruv tizimi suv taqsimoti, monitoring, ta'rif tizimi va foydalanuvchilar talablarini o'z ichiga olgan holda integratsiyalashgan.

Grafikda suv taqsimotining optimallashtirilgan, real taqsimot va suv iste'molining o'zgarishi ko'rsatilgan:



Grafikdagi belgilanishlar:

Yashil chiziq - Suvning optimallashtirilgan taqsimoti (million kubometrda).

Ko'k chiziq - Suvning real taqsimoti (million kubometrda).

Qizil chiziq - Suv iste'moli (million kubometrda).

Ushbu grafik suv resurslarini boshqarish jarayonida suv taqsimotining optimallashtirilgan taqsimoti samaradorligini va suv taqsimotining real sharoitlarga ta'sirini ko'rsatadi. Optimizatsiyalangan taqsimotda suv iste'moli yanada barqaror va samarali bo'ladi.

Kompleks, ko'p sohalarni qamrab olgan yondashuv, ilmiy, texnologik, huquqiy va iqtisodiy vositalarni birlashtirib, zamonaviy suv boshqaruv tizimini yaratishga imkon beradi, bu esa suv resurslarini saqlash va tiklashga qaratilgan. Faqat bunday yondashuv orqali suvdan barqaror foydalanish, suv xo'jaligi tizimining samaradorligini oshirish va mintaqaning tabiiy resurslarini kelajak avlodlar uchun saqlash mumkin bo'ladi, bu esa barqaror rivojlanishning milliy va mintaqaviy siyosatining strategik vazifasidir.

Xulosa. Yakuniy xulosa sifatida, suv resurslarini optimal boshqarish nafaqat texnik, balki strategik vazifa bo'lib, mamlakatlarning va hududlarning barqaror rivojlanishi uchun muhim ahamiyatga ega. Iqlim o'zgarishi va aholi sonining o'sishi sharoitida suvdan oqilona foydalanish iqtisodiy va ekologik barqarorlikning kalit omili bo'lib qoladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Салохсиддинов А.Т., Аширова О.А. Планирование и управление водными ресурсами бассейна. -Тошкент: Info Capital Group, 2020.-217 с.
2. Esonturdiyev, M. N., and A. J. Seytov. "O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI SUV RESURLARINI BOSHQARISHNI TAKOMILLASHTIRISHDA RAQAMLI TECHNOLOGIYALARINI JORIY QILISH." *Academic research in educational sciences* 2(CSPI conference 3 (2021): 775-783.
3. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. - М.: «Научный мир», 2010. - 232 с. (Монография - системный подход к управлению водными ресурсами, включает экономические и институциональные аспекты). cawater-info.net
4. Земцов В.А. Современные подходы управления водными ресурсами на Западе и в России. // Вопросы водного хозяйства / Water management review, 2001. (Обзор ключевых концепций IWRM, сравнительный анализ подходов и рекомендаций для трансформации водной политики).
5. Esonturdiyev, M. N., & Seytov, A. J. (2021). O'zbekiston respublikasi suv resurslarini boshqarishni takomillashtirishda raqamli texnologiyalarini joriy qilish. *Academic research in educational sciences*, 2(CSPI conference 3), 775-783.
6. Jia W. et al. Intelligent control technology and system of on-demand irrigation based on multiobjective optimization. *Agronomy*, 2023.

[DOI 10.5281/zenodo.20236530](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236530)

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЭКОНОМИКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТРАН К ГЛОБАЛЬНЫМ КРИЗИСАМ: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ УЗБЕКИСТАНА

Умарова Ш.Г., Уктамов М.У.

Университет мировой экономики и дипломатии

Аннотация. В тезисе рассматривается цифровизация как фактор макроэкономической устойчивости стран к глобальным кризисам. На основе панельных данных по 49 странам за 2010–2024 годы проверяется, является ли уровень цифровой зрелости статистически значимым условием смягчения последствий пандемийного и геополитического шоков. Полученные результаты показывают, что цифровизация способствует росту ВВП на душу населения во всех группах стран, однако ее антикризисный буферный эффект проявляется преимущественно в развитых экономиках, достигших высокого уровня институциональной и технологической интеграции.

Ключевые слова: цифровизация, экономическая устойчивость, макроэкономическая резильентность, интернет-проникновение, панельные данные, Узбекистан.

В условиях нарастающей турбулентности мировой экономики проблема устойчивости национальных хозяйственных систем приобретает особую научную и практическую значимость. Пандемия COVID-19, а затем геополитический и энергетический шок 2022 года показали, что способность стран поддерживать непрерывность государственных услуг, деловой активности и фискальной поддержки во многом зависит от уровня цифровой зрелости. Для Республики Узбекистан данная проблема особенно актуальна в связи с

реализацией Стратегии «Цифровой Узбекистан — 2030», ростом позиций страны в международных рейтингах электронного правительства и необходимостью превращения цифровизации из административного инструмента в реальный фактор устойчивого экономического развития.

Цель исследования заключается в оценке влияния цифровизации на макроэкономическую устойчивость стран к глобальным кризисам и выявлении условий, при которых цифровая трансформация выполняет не только функцию драйвера роста, но и функцию антикризисного буфера. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи: обобщить теоретические подходы к экономической резильентности; построить эконометрическую модель влияния цифровизации на ВВП на душу населения; оценить различия между развитыми, переходными и развивающимися экономиками; сформулировать практические выводы для Узбекистана.

Теоретическая основа исследования опирается на концепцию экономической уязвимости и резильентности, подходы ОЭСР к оценке устойчивости, а также на пятиканальную модель воздействия цифровизации на экономическую стабильность. В рамках данной модели выделены следующие каналы: непрерывность функционирования государственных институтов, эффективность фискальной трансмиссии, адаптивность частного бизнеса, диверсификация спроса и роль ИКТ-сектора как самостоятельного стабилизирующего элемента.

Эмпирическая часть исследования выполнена на основе несбалансированной панели по 49 странам за 2010–2024 годы. Выборка разделена на три группы: развитые экономики ОЭСР, страны с переходной экономикой и развивающиеся страны, включая Узбекистан. В качестве зависимой переменной использован логарифм ВВП на душу населения в постоянных ценах 2015 года, а ключевым регрессором выступил уровень проникновения интернета. Для учета кризисных эффектов в модель включены дамми-переменные пандемийного периода и геополитического шока 2022 года, а также их взаимодействия с показателем цифровизации. Расчеты выполнены в среде R с применением моделей с фиксированными эффектами и кластеризованных по странам стандартных ошибок.

Результаты эконометрического анализа подтверждают, что цифровизация является статистически значимым фактором роста ВВП на душу населения во всех группах стран. Коэффициент эластичности составил 0,212 для развитых экономик, 0,309 для переходных экономик и 0,198 для развивающихся стран. Следовательно, увеличение интернет-проникновения на 1% ассоциируется с приростом ВВП на душу населения примерно на 0,2–0,3% при прочих равных условиях.

Вместе с тем антикризисный эффект цифровизации носит пороговый характер. Взаимодействия цифровизации с кризисными переменными оказались статистически значимыми только в группе развитых стран: для пандемийного шока $\beta = 0,394$ при $p = 0,003$, для геополитического шока $\beta = 0,394$ при $p = 0,020$. В переходных и развивающихся экономиках аналогичные коэффициенты не достигли статистической значимости. Это позволяет сделать вывод, что цифровизация начинает выполнять полноценную стабилизирующую функцию лишь при наличии развитой цифровой инфраструктуры, интегрированных баз данных, цифровой идентификации и высокой степени вовлеченности частного сектора.

Особое значение имеет разграничение типов кризисов. Пандемийный шок, связанный с ограничением мобильности и необходимостью дистанционного взаимодействия, в большей степени поддается смягчению с помощью цифровых инструментов. Геополитический и энергетический шок, напротив, затрагивает физические цепочки поставок, торговлю и энергетическую безопасность, поэтому цифровизация не может полностью заменить диверсифицированную экономическую базу. Следовательно, цифровая трансформация должна рассматриваться как важный, но не единственный элемент национальной антикризисной стратегии.

Для Узбекистана результаты исследования имеют прикладное значение. Прогнозный сценарий для группы развивающихся стран показывает, что рост интернет-проникновения с 90% до 95% к 2030 году может быть связан с увеличением ВВП на душу населения примерно на 1,1% от базового уровня модели. В совокупном выражении это соответствует потенциальному макроэкономическому эффекту порядка 1,4 млрд долларов США в постоянных ценах 2015 года. Однако для превращения цифровизации в механизм устойчивости необходимы дополнительные институциональные меры.

К числу приоритетных направлений для Республики Узбекистан можно отнести:

- углубление межведомственной интеграции государственных баз данных и развитие цифровой идентификации;
- укрепление цифровой платежной инфраструктуры и механизмов адресной фискальной поддержки;
- сокращение цифрового разрыва между государственным сектором и частным бизнесом;
- стимулирование цифровизации малого и среднего предпринимательства;
- сочетание цифровой трансформации с диверсификацией торговых партнеров, логистических маршрутов и источников энергии.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что цифровизация является важным фактором экономического роста, однако ее способность смягчать внешние шоки зависит от достигнутого уровня цифровой и институциональной зрелости. Для Узбекистана ключевая задача состоит в переходе от отдельных успехов электронного правительства к системной цифровой экосистеме, охватывающей государство, бизнес и население. Именно такая модель позволит трансформировать цифровую повестку в устойчивый механизм макроэкономической резильентности.

Список использованной литературы

1. Briguglio L. et al. Economic Vulnerability and Resilience. UNU-WIDER Research Paper, 2008, No. 2008/55.
2. OECD. Strengthening Economic Resilience. OECD Economic Policy Paper No. 20. 2016.
3. United Nations DESA. UN E-Government Survey 2024. New York: United Nations, 2024.
4. World Bank. World Development Indicators (WDI). URL: <https://databank.worldbank.org>
5. Czernich N. et al. Broadband Infrastructure and Economic Growth // The Economic Journal. 2011. Vol. 121.
6. Указ Президента Республики Узбекистан № УП-6079 от 05.10.2020 «Об утверждении Стратегии Цифровой Узбекистан — 2030».
7. ITU. ICT Indicators Database. URL: <https://datahub.itu.int/>

[DOI 10.5281/zenodo.20231876](https://doi.org/10.5281/zenodo.20231876)

MARKAZIY OSIYO MAMLAKATLARIDA SUV DIPLOMATIYASI DOIRASIDA TIZIMLI TAHLIL MASALALARI VA MUAMMOLARI

U.B. Boymirzayev¹, M.N. Esonturdiyev²

¹*Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti talabasi, Toshkent, O'zbekiston*
boymirzayevubaydullo121@gmail.com

²*Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti katta o'qitubchisi, Toshkent, O'zbekiston*
esonturdiyev80@mail.ru

Annotatsiya: Annotatsiya: Mazkur maqolada arid va yarim arid hududlarda suv resurslarini boshqarishning dolzarb muammolari hamda ularni bartaraf etishning innovatsion usullari tadqiq

etilgan. Asosiy e'tibor Markaziy Osiyo mintaqasidagi suv tanqisligi, transchegaraviy suv resurslari va suv diplomatiyasining o'rni masalalariga qaratilgan. Orol dengizi qurishining ekologik, iqtisodiy va gidrogeologik oqibatlari ilmiy tahlil asosida yoritilgan. Tadqiqot davomida irrigatsiya tizimlarini modernizatsiya qilish, sun'iy intellekt va mashinali o'qitish texnologiyalaridan foydalanish orqali suvdan samarali foydalanish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Shuningdek, Integral Suv Resurslarini Boshqarish (IWRM) konsepsiyasining ahamiyati va mintaqaviy hamkorlikni mustahkamlash zarurati asoslab berilgan. Maqolada iqlim o'zgarishi sharoitida suv xavfsizligini ta'minlash, ekologik barqarorlikni mustahkamlash va qishloq xo'jaligida suv sarfini kamaytirishga qaratilgan amaliy tavsiyalar taklif etilgan. Tadqiqot natijalari mintaqaning barqaror rivojlanish strategiyalarini ishlab chiqishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat

Kalit so'zlar: arid hududlar, suv diplomatiyasi, iqlim o'zgarishi, Orolqum cho'li, Orol dengizi, gidrogeologiya, irrigatsiya, barqaror rivojlanish, transchegaraviy suv taqsimoti.

Kirish. Iqlim o'zgarishi XXI asrning eng dolzarb global muammolaridan biriga aylangan bo'lib, uning oqibatlari ayniqsa suv resurslari sohasida yaqqol namoyon bo'lmoqda. Jahon Meteorologiya Tashkilotining (WMO, 2024) ma'lumotlariga ko'ra, hozirgi kunda 3,6 milliard odam suv tanqisligiga mahkum va bu ko'rsatkich 2050-yilga kelib 5 milliarddan oshishi tahmin qilinmoqda. Bu holat Birlashgan Millatlar Tashkiloti (BMT)ning Barqaror rivojlanish maqsadlari (SDG) ichida 6-maqsadi - barcha uchun toza suv va sanitariya ta'minotiga erishish uchun shoshilinch, global hamkorlik zarurligini ko'rsatadi. Arid va yarim arid hududlar sayyoramizdagi quruqlik maydonining katta qismini qamrab oladi. Burrell va boshqalar (2020) tadqiqotlari ko'rsatishicha, quruqlik hududlar yer quruqligining 41 foizini va dunyo qishloq xo'jalik yerlarining 45 foizini tashkil etadi. Bu hududlar odamlarning tabiatga ta'siri va iqlim o'zgarishi sabab tez zarar ko'radigan joylar hisoblanadi va ular asta-sekin cho'lga aylanish xavfi bor.

Iqlim o'zgarishining suv bilan bog'liq oqibatlari ko'p qirrali bo'lib, ular kuchli va tez-tez takrorlanuvchi qurg'oqchiliklar, suv toshqinlari, beqaror mavsumiy yog'ingarchilik va muzliklarning tezlashgan erishini o'z ichiga oladi. Bu jarayonlar iqtisodiyot, ekotizimlar va kundalik hayotning barcha jihatlariga zanjirsimon ta'sir ko'rsatadi (WMO, 2024).

Markaziy Osiyo mintaqasi, xususan O'zbekiston o'zining geografik joylashuvi tufayli ushbu global muammoga nisbatan zaif bo'lib, buning oqibatida bir qator murakkab muammolarga duch kelmoqda:

Birinchidan, suv resurslarining transchegaraviy tabiati hamda ularning taqsimoti va boshqaruvi masalalari yuzasidan davlatlar o'rtasida turli ziddiyatlar.

Ikkinchidan, Sovet davridan meros bo'lib qolgan va suvdan foydalanish samaradorligi past bo'lgan irrigatsiya tizimlari.

Uchinchidan, Orol dengizining qurib borishi natijasida keng ko'lamli ekologik va gidrogeologik buzilishlar.

To'rtinchidan, aholi sonining o'sishi, sanoatlashuv jarayonlari va iqlim o'zgarishining birgalikdagi ta'siri suv tanqisligi muammosining yanada kuchayishi.

Asosiy qism. Suv diplomatiyasi - transchegaraviy suv resurslarini xalqaro huquq, ko'p tomonlama muzokaralar va ikki tomonlama kelishuvlar orqali adolatli taqsimlash va birgalikda boshqarishga qaratilgan siyosiy-diplomatik faoliyat majmuasidir. Bu soha xalqaro munosabatlar, atrof-muhit huquqi, mojarolarni hal etish va gidrologiya fanlarining kesishmasida joylashgan fanlararo intizomni tashkil etadi (Zeitoun & Mirumachi, 2008).

Suv diplomatiyasining uch asosiy tamoyili - adolatlilik, barqarorlik va iqtisodiy samaradorlik - Markaziy Osiyodagi suv muzokaralarining nazariy poydevorini tashkil etadi. Ushbu tamoyillar amalda qo'llanilmaganda esa bir qator ob'ektiv ziddiyatlar paydo bo'ladi: yuqori oqimdagi davlatlar (Qirg'iziston, Tojikiston) gidroenergetika manfaatlarini ustuvor ko'rishsa, quyi oqimdagi davlatlar (O'zbekiston, Turkmaniston, Qozog'iston) irrigatsiya va qishloq xo'jaligi ehtiyojlarini birinchi o'ringa qo'yadi (MDPI Sustainability, 2025). MDPI Sustainability (2025) jurnalida ta'kidlanishicha, Markaziy Osiyo suv resurslarining 86 foizi yuqori oqimdagi Qirg'iziston va Tojikistonda

shakllanadi, quyi oqimdagi O'zbekiston, Turkmaniston va Qozog'iston irrigatsiya, qishloq xo'jaligi hamda sanoat ehtiyojlari uchun ushbu suv resurslariga kuchli darajada qaram holatdalar. Sobiq Savet Ittifoqi markazlashgan boshqaruvidan milliy siyosatga o'tish jarayoni suv taqsimoti va gidroenergetika sohalarida bir qator siyosiy muammolarga olib kelmoqda.

Orol dengizi muammosi - XX asrda sodir bo'lgan eng yirik inson qo'li bilan yuzaga kelgan ekologik falokatlardan biri sifatida dunyo hamjamiyati tomonidan tan olingan. Encyclopaedia Britannica (2024) ma'lumotlariga ko'ra, bir paytlar dunyodagi to'rtinchi yirik ichki suv havzasi hisoblangan Orol dengizi 1960-yilda 68 000 km² maydoni va 1 100 km³ hajmi bilan ulkan ahamiyatga ega bo'lgan. Biroq XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab irrigatsiya maqsadida Amudaryo va Sirdaryo suvlarini boshqa yo'nalishlarga burish natijasida dengiz keskin qisqarib ketdi: 1960-yildan 1998-yilgacha suv yuzasi 60 foizga, hajmi esa 80 foizga kamaydi. 2007-yilga kelib esa Orol dengizining atigi 10 foizi saqlanib qoldi.

Fojianing asosiy sababi Sovet davrida amalga oshirilgan paxta yakkahokimligini o'rnatish siyosatidir. ScienceAlert (2025) ma'lumotlariga ko'ra, 1960-yillardan 1990-yillargacha Sovet Ittifoqi 7 million gektarlik paxta dalalarini sug'orish maqsadida ikkala daryoning oqimini to'liq boshqa yo'nalishga burdi va natijada ko'l o'z suv manbasidan butunlay mahrum bo'ldi. Daryo.uz (2023) tomonidan e'lon qilingan tarixiy hujjatlar General Kaufmannning 1872-yilgi maxfiy maktubida ushbu siyosatning aniq maqsad sifatida belgilanganligini ko'rsatadi - bu esa muammoning tarixiy ildizlari yanada chuqur ekanligidan dalolat beradi.

Orol dengizining qurib qolishi nafaqat ekologik, balki chuqur gidrogeologik o'zgarishlarga ham sabab bo'ldi. Birinchidan, dengiz sathining pasayishi bilan tuproq qatlamlarining suv o'tkazuvchanlik xususiyatlari o'zgardi va yerosti suvlarining tuzlanish darajasi keskin oshdi. Karimov (2014) ning tadqiqotlari Orol dengizi atrofida 150 km radiusda yerosti suvlarining minerallashuv darajasi so'nggi 30 yil mobaynida o'rtacha 2,5 baravarga oshganligini aniqlagan. Ikkinchidan, Orolqum cho'lining shakllanishi yangi iqlimiy omillarni yuzaga keltirdi: yiliga 75-150 million tonna tuz va qumoq keng maydon bo'ylab tarqalib, tuproq tuzlanishini yanada kuchaytirmoqda, ta'sir zonasi esa 1500 - 2000 km gacha yetadi. Uchinchidan, dengizning "termostabilizatsiya" funktsiyasi yo'qolganligi sababli mintaqadagi gidrotermik rejim tubdan o'zgardi - qishlar 2-3°C sovib, yozlar 1-2°C isib ketdi, bu esa vegetatsiya davrini qisqartirdi va qishloq xo'jaligi uchun salbiy oqibatlar keltirmoqda.

Qoraqalpog'iston va Xorazm viloyatlarida Landsat va Sentinel-2 sun'iy yo'ldosh tasvirlari tahlillariga ko'ra, 1990–2023-yillar mobaynida sug'oriladigan yer maydonlari 10-20 foizga qisqargan, o'simlik indeksi (NDVI) qiymatlarining pasayishi esa tuproq sho'rlanishining jadallashib borayotganligini ko'rsatmoqda (Bekchanov et al., 2019).

Orol dengizini to'liq tiklash ilmiy jihatdan mumkin bo'lmasa-da, mintaqaning ekologik ahvolini yaxshilash uchun texnik va moliyaviy imkoniyatlar mavjud. O'zbekiston tomonidan qurilgan Ko'kdaryo (2005) va Aklak (2010) to'g'onlari muvaffaqiyatli tajriba bo'ldi: Kichik Orol dengizi sathi 42 metrdan 46 metrga ko'tarildi va baliqchilik qayta tiklandi. UNDP va GEF tomonidan moliyalanayotgan "Orol dengizi havzasini barqaror boshqarish" dasturi doirasida 2025–2030-yillarda Amudaryo deltasini ekologik tiklash va Qoraqalpog'istonda alternativ tirikchilik manbalarini yaratish ko'zda tutilmoqda (UNDP, 2024). Bundan tashqari, hozirga qadar 1,7 million gektar Orolqum maydoni saksovl bilan ko'kalamzorlashtirilib, tuzli chang bo'ronlarining oldini olishning arzon va samarali usuli sifatida ijobiy natijalar bermoqda (O'zbekiston Ekologiya vazirligi, 2024).

So'nggi yillarda mintaqada bir qator muhim ikki tomonlama va ko'p tomonlama kelishuvlar imzolangan. UNECE va UNESCO (2024) monitoringlariga ko'ra, Qirg'iziston 2022-yilda O'zbekiston bilan suv boshqaruviga doir ikki shartnoma imzoladi, bu esa SDG 6.5.2 ko'rsatkichini yaxshilashga hissa qo'shdi. Shuningdek, Turkmaniston va O'zbekiston 2021 va 2022-yillarda Amudaryoni muhofaza qilish bo'yicha yangi bitimlar tuzdi.

Toshkentda 2023-yil oktyabrda bo'lib o'tgan Markaziy Osiyo davlat rahbarlari sammitida "Yashil Markaziy Osiyo" tashabbusi doirasida suv resurslarini tejash va iqtisodiy samaradorlikni

oshirishga qaratilgan maqsadli investitsiya dasturi qabul qilindi. Mazkur dastur doirasida 2025-2030-yillar mobaynida mintaqadagi irrigatsiya infratuzilmasini modernizatsiya qilish uchun 3,2 milliard AQSh dollari miqdorida investitsiya jalb qilish ko'zda tutilmoqda (CAREC, 2023). Green Central Asia (2025a) ma'lumotlariga ko'ra, 2025-yil yanvarda bo'lib o'tgan **Sirdaryo havzasi muloqot yig'ilishida** ishtirokchilar iqlimga bardoshli suv resurslarini boshqarish usullarini joriy etish bo'yicha keyingi qadamlar yuzasidan kelishib oldi. Mazkur muloqot Germaniya Iqtisodiy Hamkorlik va Rivojlanish Federal Vazirligi (BMZ), Yevropa Ittifoqi va Shveytsariya Rivojlanish va Hamkorlik Agentligi (SDC) tomonidan moliyalashtirildi.

Tizimli tahlil nuqtai nazaridan suv diplomatiyasini to'rtta asosiy o'lcham bo'yicha ko'rib chiqish mumkin:

- a) huquqiy-institutsional o'lcham - xalqaro konvensiyalar, milliy qonunchilik va shartnomaviy majburiyatlar;
- b) texnik o'lcham - suv infratuzilmasi, gidrometeorologik monitoring va sug'orish texnologiyalari;
- c) iqtisodiy o'lcham - suv narxlanishi, subsidiyalar siyosati va bozor mexanizmlari;
- d) ijtimoiy-siyosiy o'lcham - manfaatdor tomonlarning ishtiroki, jamoat nazorati va gender tengligini ta'minlash.

Ushbu to'rt o'lchamni birlashtiruvchi Integral Suv Resurslarini Boshqarish (IWRM — Integrated Water Resources Management) konseptsiyasi GWP (2022) tomonidan asosiy yo'l sifatida tavsiya etilgan. IWRM yondashuvining asosiy qoidasi shundan iboratki, suv havzasini bir butun ekotizim sifatida ko'rib chiqish va uni boshqarishda barcha manfaatdor tomonlarni - davlat idoralari, fermerlar, sanoat korxonalari, fuqarolik jamiyati va atrof-muhit tashkilotlarini - birga jalb qilish zarur. O'zbekistonda ushbu yondashuv 2018-yildan boshlab Suv xo'jaligi vazirligi tomonidan amalga tatbiq etilmoqda (O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi, 2022).

Irigatsiya — arid hududlarda suv iste'molining 70–90 foizini tashkil etadi. Markaziy Osiyoda bu ko'rsatkich 90 foizdan oshadi va mintqa Amudaryo va Sirdaryo suvlarining 90 foizidan ko'prog'ini qishloq xo'jaligiga sarflaydi (FAO, 2023). Bu sharoitda irrigatsiya tizimlarini optimallashtirish suv tejashning eng samarali o'nalishi hisoblanadi.

IWA Publishing (2025) jurnalida ta'kidlanishicha, qishloq xo'jaligi suv boshqaruvida mashinali o'qitish sohasidagi so'nggi yutuqlar EMD-LSTM, LSTM-INFO, RVFL-EROA, ANFIS-WCAMFO va ANN-RUNAO kabi murakkab modellarni o'z ichiga oladi va ular gidrologik va ekologik ilovalar uchun vaqt qatori modellashtirish bo'yicha yuqori ishlash qobiliyatini namoyish etmoqda.

Arid mintaqalarda iqlimiy, tuproq va fazoviy-vaqtli ma'lumotlarni o'z ichiga olgan **RF**, **ANN** va **SVM** modellari prognoz aniqligini sezilarli darajada oshirishi isbotlangan.

Amaliy nuqtai nazardan, Farg'ona vodiysida o'tkazilgan tajriba-sinov loyihasida mashinali o'qitish asosida qurilgan irrigatsiya qarorini qo'llab-quvvatlash tizimi (DSS) tatbiq etildi. Ushbu tizim tuproq namligi sensorlari (IoT), ob-havo prognozi ma'lumotlari va o'simlik o'sish fazalari modelini birlashtirgan holda ishlaydi. Natijada paxta yetishtirishda suv iste'moli 23 foizga kamaydi, hosildorlik esa 8 foizga oshdi (Tursunov et al., 2022). Bu tajriba keng miqyosda tatbiq etilsa, yiliga 1,2–1,8 km³ suvni tejash mumkinligini ko'rsatmoqda. Arid hududlarda yerosti suvlari yer usti suv oqimlarning kamayishi sharoitida suv ta'minotining muqobil manbai sifatida tobora katta ahamiyat kasb etmoqda. MODFLOW modeli (McDonald & Harbaugh, 1988) — uch o'lchamli yerosti suv oqimini modellashtiruvchi standart dastur — O'zbekistonning Qashqadaryo va Surxondaryo havzalarida qo'llanilmoqda.

Suv Diplomatiyasida Tizimli Yondashuv Zarurligi. Markaziy Osiyo suv muammolarini hal etishda "texnik muammo" yondashuvi yetarli emas. Ijtimoiy-siyosiy, iqtisodiy va ekologik omillarni bir butun tizim sifatida ko'rib chiquvchi IWRM yondashuvi mintaqaviy kelishuvlarning samarali poydevori bo'lishi mumkin. 1992-yildagi ICWC kelishuvini CMIP6 iqlim prognozlari asosida yangilanishi va yangi texnologiya yutuqlarini hisobga olgan holda modernizatsiya qilish dolzarb masala bo'lib turibdi.

SWAT, MODFLOW, ABM va LSTM kabi modellar suv boshqaruvi qarorlarini qabul qilishda ilmiy-texnik asosni ta'minlaydi. Biroq bu modellarning samarali ishlashi uchun gidrometeorologik monitoring tarmog'ini kengaytirish va ma'lumotlar sifatini yaxshilash zarur. Mintaqaviy davlatlar o'rtasida ma'lumotlarni ulashish platformasini yaratish modeling aniqligini sezilarli darajada oshiradi.

Sun'iy Intellekt va Big Data Texnologiyalarining Transformativ Salohiyati. PINNs, LSTM va Random Forest algoritmlari an'anaviy gidrologik modellar aniqligini oshirishda muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda. IoT sensorlari va real vaqt ma'lumotlari asosida qurilgan qarorni qo'llab-quvvatlash tizimlari irrigatsiya samaradorligini 20–25 foizga oshirish va suv iste'molini shu darajada kamaytirish imkonini beradi. Bu texnologiyalarni keng tatbiq etish uchun davlat investitsiyalari va xalqaro moliyaviy qo'llab-quvvatlash zarur.

Iqlimga Moslashishning Iqtisodiy jihatdan oqilonaligi. Iqlimga moslashish chora-tadbirlariga — suv tejaydigan irrigatsiya, quruqchilikka chidamli navlar, smart metering - sarflanadigan investitsiyalar kelajakdagi iqlim zarar-ziyonlarini bir necha barobar qoplaydi. O'zbekiston uchun 2030-yilga qadar suv tejash potentsiali yillik 8-12 km³ ni tashkil etishi mumkin, bu mavjud suv iste'molining 20–30 foiziga to'g'ri keladi.

Xulosa: Iqlim o'zgarishi sharoitida arid hududlarda suv resurslarini boshqarish va suv diplomatiyasining muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatdi. Markaziy Osiyoda suv tanqisligi, Orol dengizi inqirozi va transchegaraviy suv resurslariga bog'liqlik mintaqaviy hamkorlikni kuchaytirishni talab etadi. Maqolada IWRM konsepsiyasi, sun'iy intellekt va zamonaviy modellashtirish texnologiyalari suvdan samarali foydalanishda muhim vosita ekanligi asoslandi. Suv tejovchi irrigatsiya tizimlari, ekologik tiklash dasturlari va xalqaro kelishuvlarni rivojlantirish mintaqada suv xavfsizligi hamda barqaror rivojlanishni ta'minlashning asosiy omili sifatida baholandi.

Foydalanilgan Adabiyotlar

1. Bekchanov, M., Ringler, C., & Bhaduri, A. (2019). *Remote sensing analysis of irrigated land degradation and salinization in the Aral Sea Basin*. Journal of Arid Environments, 165, 12–21.
2. Burrell, A. L., Evans, J. P., & De Kauwe, M. G. (2020). Climate change and dryland expansion impacts on global ecosystems. *Nature Climate Change*, 10(4), 315–320.
3. Karimov, B. (2014). *Hydrogeological changes in the Aral Sea region and groundwater salinization trends*. Tashkent: Fan Publishing.
4. McDonald, M.G., & Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (MODFLOW)*. Reston, VA: U.S. Geological Survey.
5. MDPI Sustainability. (2025). Transboundary water governance challenges in Central Asia. *Sustainability*, 17(3), 1150–1168.
6. O'zbekiston Ekologiya vazirligi. (2024). *Orolqum hududini ko'kalamzorlashtirish bo'yicha milliy hisobot*. Toshkent.
7. Tursunov, A., Rakhimov, J., & Yuldashev, S. (2022). Smart irrigation decision support systems in the Fergana Valley. *Water Resources Management*, 36(8), 2541–2558.
8. UNDP. (2024). *Aral Sea Basin sustainable management programme 2025–2030*. United Nations Development Programme. Retrieved from [UNDP](#).
9. WMO. (2024). *State of global water resources report 2024*. World Meteorological Organization. Retrieved from [World Meteorological Organization](#).
10. Zeitoun, M., & Mirumachi, N. (2008). Transboundary water interaction I: Reconsidering conflict and cooperation. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 8(4), 297–316.

METHODS OF HYDRAULIC CALCULATIONS FOR IMPROVEMENT OPERATION AND DESIGN OF IRRIGATION CANALS WITH EARTHEN CHANNELS

Saparov A.B¹, D.Q.Jumamuratov^{1,2}

¹Karakalpak Institute of Agriculture and Agrotechnology

²Karakalpak State University

Summary: In this article, what are the conditions for the design of natural channels there are thoughts about its implementation. Mainly as a result of analysis of various methods Uzbekistan fuzzy speed and fuzzy transmission obtained as a result of research in the area ability formulas were proposed.

Key words: method, channels, speed, water flow, siltation, erosion, dynamics, stability, sediment, exploitation.

Introduction. There are many methods of channel design by several scientists in the world developed. One of the methods for designing hydraulic strong channels is the mode method It was presented by Kennedy, and as the boundary conditions of this method, Chang minimum current capacity by Brebner and Wilson, minimum by scientists such as Young energy dissipation, the maximum sediment transport capacity suggested by White et al done.

For cases where the amount of turbidity in the stream and water consumption change little over time a rational method was developed by scientists such as Better and Paris, Chang. Shields, like Lane. The method of determining the critical values of the experimental force proposed by scientists is known serves as the basis for the method of determining the permissible speeds in the channel.

Analysis of methods and materials. Mode method [1,2,3] channels that have achieved dynamic stability and presents a set of empirical formulas developed on the basis of observation of rivers.

Alluvial channel can be called dynamic stable for a certain long period of time depth, width and slope should be stabilized in a state of balance. It's a seasonal blur pressure or washing can be observed, but the total channel dimensions during one water year remains unchanged. For this, the amount of turbidity entering the channel and the average sediment the transmission capacity should be suitable, that is, the pressure during the period with a high amount of fuzzy input the amount of turbidity must be equal to the amount of washed turbidity during the erosion period.

The formulas of the mode method are not the instantaneous changing state of the channel, but the previous and proposes to determine the long-term mean condition based on current observations and experiments and to use natural alluvial channels that transmit mud to achieve dynamic stability tries to express the tendency.

One of the widely used mode methods was introduced by Lacey in 1930 is a collection of formulas derived from three irrigation systems in India based on data. These formulas are water consumption and cross the channel depending on the material designed to determine the cross-section and slope and small changes in the coefficients and is still used with a revision of the fuzzy click indicator.

The formulas proposed by Lacey are as follows [1,4,7,9]:

$$f = \sqrt{2520d} \quad (1.1)$$

$$P = 4,836 Q^{0,5} \quad (1.2)$$

$$g = 0,6459 (fR)^{0,5} \quad (1.3)$$

$$i = 0,000315 \frac{f^{5/3}}{Q^{1/6}} \quad (1.4)$$

In this: f -d Lacey's turbidity index for size sediment; d - sediment size, m/s;

Q - water consumption, m^3/s ; R - hydraulic radius, m ; $\mathcal{G}$ - average speed, m/s ; i - channel bottom slope.

According to Lacey, these formulas are used when the flow and sediment properties are as follows can be used:

- Water consumption from 0,15 to 150 m^3/s ;
- The channel soil is not attached
- Channel shape riffled
- Channel soil dimensions
- The amount of bottom sediments is relatively small.

Five types of channels are extracted from the collected data and used to design channels individual coefficients for one type are given as in table 1.

Channel type		Coefficients					
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_1	n
1	The bottom and shores are sand	6,34	0,4-0,6	9,33	0,33	2,6	0,33
2	The bottom is sand, and the shores are connected priming	4,71	0,48	10,80	0,53	2,25	0,33
3	Bottom and banks connected soils coarse loose soil	4,0-4,7	0,41-0,56	-	0,88	2,25	-
4	Coarse loose soil	3,2-3,5	0,25	4,80	-	0,94	-
5	The bottom is sand, the shore is connected with ground and high sediment consumption	3,08	0,37	9,70	-	-	0,29

Table 1. values of the coefficients of the Simons and Albertson formulas for different types of channels

Regime theory methods are used in many places where irrigated agriculture is developed despite the fact that it is being used, it is not widely spread to other places means that all physical parameters are not related to these formulas.

Attempted force method. The method of tensile strength theory is limit tensile stress and settlement based on the relationship between spending. This method is the grunt on the side walls and bottom of the channel from the concept of static stability of the channel, in which there is no movement in the material is used. For a given consumption, the channel dimensions and the bottom slope allow the speed of the flow not to exceed the speed or ground stress from the permissible stress it is accepted taking into account the non-exceeding. These values are critical for channel bottoms and banks values are compared. Two methods are used in the world based on the theory of effort force coming [3,5,8]:

- critical stress.
- method of permissible speeds;

The tensile strength depends on the tensile stress at the bottom of the channel and can be expressed as follows:

$$\tau = c\rho gy i_0 \quad (1.5)$$

in this

τ -tensile strength per unit wetted area, H/m^2 ;

c - is the correction factor, B/y depends on the ratio:

$$0,065(B/y)$$

$1 < B/y < 4$ for the situation $c=0.77e$; $B/y \geq 4$ for the situation $c=1$;

$P=1000 \text{ kg/m}^3$ - water density; i_0 - channel bottom slope; y - flow depth, m ; g - free fall speed, m ;

The concept of effort force was first introduced in 1955 by the US Bureau of Reclamation, Lane presented as a result of the work conducted under the leadership of [2,3].

Distribution of tensile stress in narrow and trapezoidal channels along the channel bed not the same. According to Lane's experiments, both for the bottom of the channel and for the side walls and the correction factor is the relative width of the channel B/y and sidewall slope m depends on [3,4,5,6,9]. Based on a large amount of field experience data, Lane in 1955 critical effort force made a diagram. In this diagram, the critical strength value is plotted at different amounts to the average size of subsoil particles for channels carrying concentrated waters relationship is expressed (Fig.1).

These diagrams are combined with Manning's or Shezi's steady flow formulas can be used to design a hydraulically robust channel.

Permissible speed method. Channels using this method in our republic the average speed in the channel should be as follows:

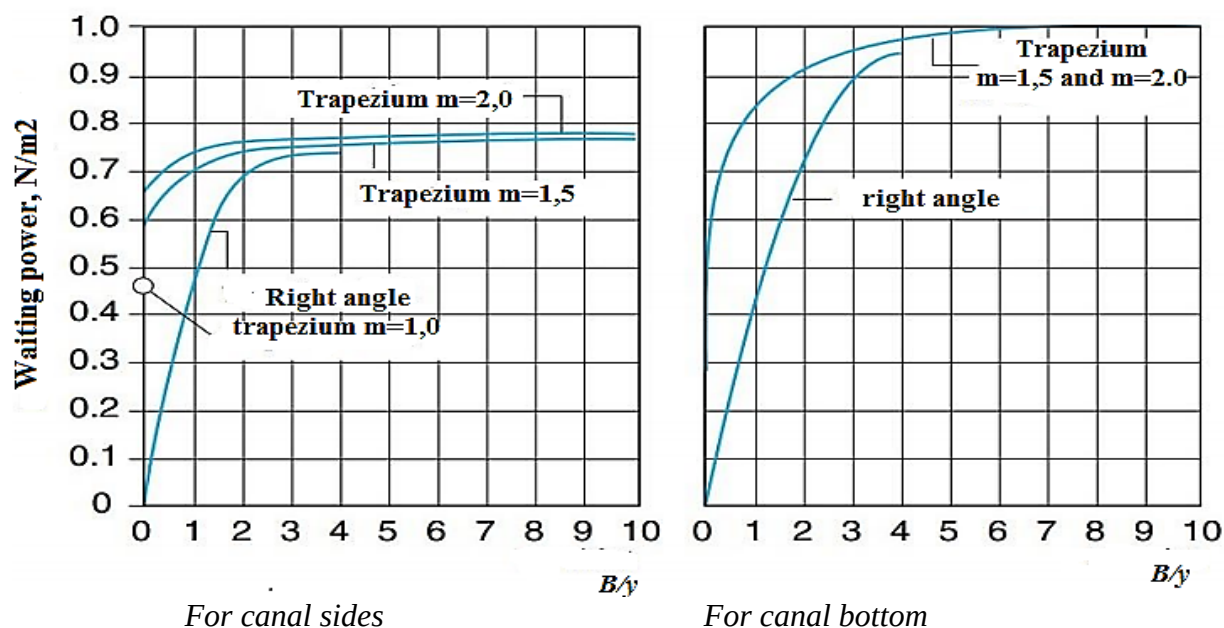


Fig. 1. Maximum stress in the channel, Lane 1953.

$$\mathcal{G}_i < \mathcal{G} < \mathcal{G}_{un} \quad (1.6)$$

In that: $\mathcal{G}_i$ - minimum permissible speed without silting, m/s

$\mathcal{G}_{un}$ - permissible non-eroded maximum speed, in the channel, m/s

Designing is carried out in the following order:

1. The soil that forms the basis of the canal and the roughness corresponding to the consumption of the canal coefficient n and the slope coefficient m building codes and regulations BC and N - 2.06.03.97 determined based on.
2. The width of the channel bottom is determined using the S.A. Girshkan formula:

$$b_G = A Q^x \quad (1.7)$$

If $Q < 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ if, $A=1,4$; $x=0,85$;

If $Q < 1,5 \div 50 \text{ m}^3/\text{s}$ if, $A=1,5$; $x=2/3$;

If $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ if, $A=1,3$; $x=0,85$;

The width of the defined channel bed b_G value is the closest b_{st} standard is rounded up to the value.

3. BC and N for several values of flow depth corresponding to the channel ground ($h=0.5$; 1.0 ; 3.0 ; 5.0 m) of the maximum permissible non-flushing flow rates values $\mathcal{G}_{un}$ is recorded.

4. The average water velocities are given in BC and N for each water depth ($h=0.5$; 1.0 ; 3.0 ; 5.0 m) is calculated using the following formula:

$$g = \frac{Q}{\omega} \quad (1.8)$$

5. Water velocities obtained using BC and N $g_{un} = f(h)$ and are defined by formula (1.8) dependence of the calculated average water speed on water depth $g_{mc} = \varphi(h)$ a schedule will be created. The speed corresponding to the intersection point of the two graphs is determined by the non-blurring speed of the channel (Fig.2).

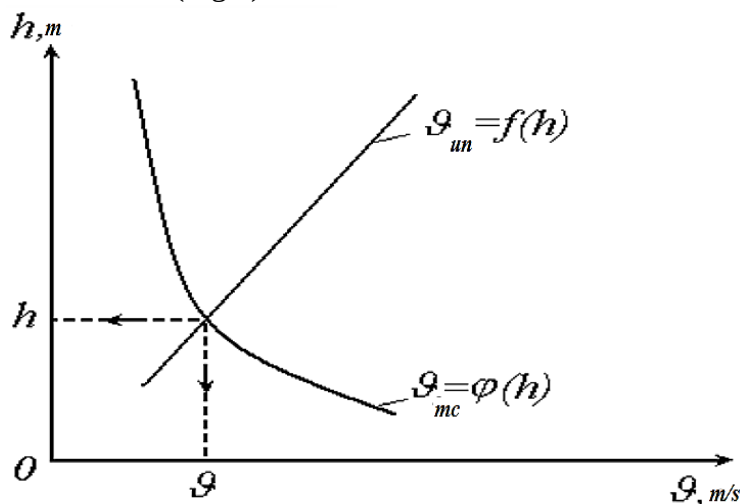


Fig. 2. Graph for determining the non-scouring velocity in the channel.

6. Water speed from the graph g and water depth h based on the slope of the channel bottom is calculated using the following formula:

$$i = \frac{g^2}{C^2 R} \quad (1.9)$$

7. The transport capacity of sediment in the channel is checked. Sediment transfer capacity is the ability of the current to carry a certain amount of turbidity without sedimentation. Sediment transmission capacity is determined by BC and N as follows [1,4,8,10]:

- hydraulic size $2 < W < 8 \text{ mm/s}$ then

$$S = 700 \left(\frac{g}{W} \right)^{3/2} \sqrt{Ri} \quad (1.10)$$

- hydraulic size $4 < W < 2 \text{ mm/s}$ then

$$S = 350g \sqrt{\frac{Ri g}{W}} \quad (1.11)$$

In this: S - sediment transport capacity of the stream, g/m^3 ; W - medium diameter the hydraulic size of the particle (obtained from BC and N), mm/s ;

8. A.Arifzhanov, taking into account that sediments in the stream have different sizes, the following formula for calculating the transporting capacity of a flow is proposed in [8]:

$$S = \alpha \frac{g^3}{g \cdot R \cdot \overline{W}} \quad (1.12)$$

here:

$$\alpha = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^3 \text{ or } \alpha = \sqrt[4]{\frac{W_0}{W}}; \quad W_0 = 0,069 \text{ mm / s}$$

d_1 - sediment diameter, (mm); d_0 - "optimal" diameter, that is, its speed is equal to the flow rate diameter of sediment particles, (mm).



Fig. 3. Siltation and erosion in the Anasay main canal in the Republic of Karakalpakstan (2024)

9. The acceptable minimum non-silting speed is determined by the following two formulas based on BC and N:

$$\mathcal{G}_l = 0,3R^{0,25} \quad (1.13)$$

$$\mathcal{G}_l = AQ^{0,2} \quad (1.14)$$

In this: A - empirical coefficient; $W < 1,5$ mm/s then $A = 0,33$; $W = 1,5 \div 3,5$ mm/s then $A = 0,44$; $W > 3,5$ mm/s $A = 0,55$.

10. Formula developed by A. Arifzhanov, based on the results of studies conducted in the conditions of Uzbekistan you can determine the rate of siltation:

$$\mathcal{G}_l = \alpha_0 \sqrt[3]{\rho g R W}; \quad \alpha_0 = \sqrt[4]{\frac{W}{W_0}}. \quad (1.15)$$

Conclusion. Channel length with dynamic speed to avoid washout in the irrigation network should not decrease or change depending on the speed of water flow in natural channels if it is too small, there is a risk of muddying the riverbed. That's why the channel is blurry with the average speed of water flow in the channel, which determines the possible maximum speed comparison is necessary. It should be noted that in the conditions of Uzbekistan and determining the fuzzy click rate for the channels being designed is of great practical importance. Because the canals in Uzbekistan mainly receive water from Amudarya and Syrdarya. The Amudarya and Syrdarya rivers have a lot of sediments. That's why in the first place calculating the rate of fuzzy clicks in channels depending on the fuzzy transmission ability of the stream it will be necessary. For this reason, we have presented ourselves based on the results of the research conducted in our region It is intended to carry out design works using the obtained formulas and equations according to.

References:

1. Saparov, A. B., Djumanazarova, A. T., & Saparov, B. B. (2023). Methods of hydraulic calculations for operation and design of irrigation channels with earth bed. *БЕСТИИК Каракалпакского государственного университета имени Бердаха, Махсус сон*, (62), 172-176.
2. Glovatskiy, O., Djumanazarova, A., Saparov, A., Nasirova, N., Sultonov, A., & Sattorov, A. (2023). Improvement of water distribution management methods for operating modes of machine channels. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 01023). EDP Sciences.

3. Saparov, A. B., Khidirov, S. K., Khalimbetov, A. B., Djumanazarova, A. T., Tolepova, S. B., & Seitmuratov, A. R. (2023). Methods of channel calculations to improve the operational mode of main canals. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 410, p. 05035). EDP Sciences.
4. Сапаров, Б. Б., & Сапаров, А. Б. (2023). ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО КАНАЛА АНАСАЙ. INTERNATIONAL SCIENTIFIC FORUM. Ilg'or tadqiqotlar ilmiy markazi. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11000793>
6. Сапаров, А. Б., Джуманазарова, А. Т., & Сапаров, Б. Б. (2022). МЕТОДИКА РАСЧЁТА ДЕФОРМАЦИИ КАНАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН). In *Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата* (pp. 176-182).
7. Islamov, K., & Saparov, A. (2025). Water flow in rivers and canals carrying suspended and bottom sediments. *Journal of Science and Education in Karakalpakstan*, 2/1(48), 70-76.
8. Bazarov, D. R., Saparov, A. B., Saparov, B. B., & Norkulov, B. E. (2024). Permissible flow velocities for improving operation and reliability of the Anasay main canal. *Journal of Science and Education in Karakalpakstan*, 3/2(43), 207-212.
9. Сапаров, А. Б., & Исламов, К. А. (2022). Математическое моделирование процессов водораспределения (на примере головного сооружения магистрального канала Анасай). *Проблемы строительства и архитектуры*, 4(2), 116-118.
10. B.S.Pani, Sediment transport and river engineering. Textbook. Hohai University, 2019, 106 pages.

Rezyume: Ushbu maqolada tuproq o'zanli kanallarni ekspluatatsiya qilish va loyihalashda qanday shartlar bajarilishi haqida fikrlar yuritilgan. Asosan turli xil usullarni tahlil qilish natijasida O'zbekiston hududida olib borilgan tadqiqotlar natijasida olingan loyqa bosmaslik tezligi va loyqa uzatish qobiliyati formulalar taklif etildi.

Резюме: В данной статье рассматриваются условия эксплуатации и проектирования каналов с земляным руслом. На основе анализа различных методов предложены формулы не заиляющей скорости и транспортирующей способности наносов, полученные в результате исследований, проведенных на территории Узбекистана.

Kalit so'zlar: usul, kanallar, tezlik, suv sarfi, loyqa bosish, yuvilish, dinamika, barqarorlik, cho'kindi, ekspluatatsiya.

Ключевые слова: метод, каналы, скорость, расход воды, заиление, размыв, динамика, устойчивость, наносы, эксплуатация.

Saparov Amanbay Berdibayevich - Qoraqalpog'iston qishloq xo'jaligi va agrotexnologiyalar instituti, PhD, assistent, Nukus shahri, Sulayman Baqirg'aniy ko'chasi 2 uy, E-mail: irrigator-1986@mail.ru, tel: +998 97 354 75 57.

ON THE QUESTION OF CALCULATING THE SEDIMENTATION (SILTATION) OF BACKED-UP REACHES OF LOW-HEAD DAMS

Baimanov Ruslan Kenesbaevich¹, Adenbayev Asenbay Sabitovich²

¹ Karakalpak State University, Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Department of "Construction of Complex Engineering Structures",

² Karakalpak State University, 1st-year doctoral student.

¹ruslan_kenesbaevich@list.ru

²aadenbayev@gmail.com

Abstract. This paper examines sedimentation processes in backwater reaches of low-head hydraulic structures, focusing on the interaction between flow, channel morphology, and sediment transport. Based on existing methods (primarily those of S. T. Altunin and V. N. Sholokhov) and field data from river hydroschemes, the study analyzes the staged development of sediment deposition, changes in backwater length, and associated hydraulic conditions. Special attention is given to sandy and gravel-pebble sedimentation schemes, limiting slope formation, and long-term morphological adjustments of river channels. Case studies of the Takhiatash and Tuyamuyun hydroschemes on the Amu Darya River illustrate significant channel transformations, including backwater extension and bed aggradation. The results emphasize the importance of accurate sedimentation forecasting for ensuring the reliable operation of hydraulic structures and water intake systems.

Channel deformations caused by hydraulic structures on rivers are characterized by the extremely complex interaction between the riverbed, the flow, and the structure itself. Although studies of these processes conducted by scientists from various countries have achieved significant results, they are still insufficient.

At present, only siltation processes lend themselves to relatively complete analysis, whereas sediment deposition processes are still evaluated insufficiently. At the same time, the operation of low-head dams continues to face numerous difficulties and adverse consequences associated with channel reformation, in which sediment deposition processes are the dominant factor.

There are considerably fewer methods for predicting the sediment deposition of backed-up reaches than methods for predicting siltation. The most well-known is the method developed by S. T. Altunin [1], which was later further developed by V. N. Sholokhov [2].

The method is based on the use of data on the actual sediment deposition in a number of backwater reaches, including the well-studied Sarykurgan Hydroscheme on the Sokh River and the Gazalkent Hydroscheme on the Chirchiq River, investigated both in field conditions and on hydraulic models.

The period of sediment deposition is divided into three calculation stages. The end of the first stage is considered to be the moment when the bed load sediments reach the hydroscheme; by this time, the backwater length is assumed to be equal to 1.8–2 times the initial backwater length, which is determined by the formula

$$l_0 = H_{\pi} / i_0$$

The second period is characterized by the transport of part of the sediments into the downstream reach; its end is determined by the cessation of the general scour of the channel in the downstream reach due to the removal of part of the sediments from the upstream reach. At this moment in time, the backwater length is equal to 5.5 times the initial backwater length.

At the end of the third period, almost all the sediments will have passed through the hydroscheme cross-section, and the backwater length will be equal to 8–10 times the initial backwater length. It

also follows that, according to V. N. Sholokhov, the slope in a completely sediment-filled backwater reach amounts to 7/8–9/10 of the natural channel slope.

The duration of the indicated formation periods is determined by the following relationship:

$$T = \frac{W}{\alpha_{cp} \cdot \beta_{cp} \cdot G} \quad (1)$$

where:

- T - duration of sediment deposition (years);
- W - volume of sediment deposition, thousand m^3 ;
- G - average annual bed-load sediment discharge, thousand m^3 /year;
- α_{cp} - share of suspended sediments participating in the sedimentation of the backed-up reach (during the first formation period, $\alpha_{cp} = 1.0 - 2.0$; during the second and third periods, $\alpha_{cp} = 1.0$);
- β_{cp} - coefficient of sediment accumulation in the backed-up reach; during the first period all bed sediments are retained, while during the subsequent periods the retention ratio varies from 0.94 to 0.1 and depends on the proportion of water withdrawal and the characteristics of the river section where the backed-up reach is formed.

The process of sediment deposition in backed-up reaches by coarse and fine sandy sediments is physically very similar to the accumulative processes frequently observed in rivers; however, in terms of intensity, it significantly exceeds natural river processes [3, 4].

As a result of the studies carried out by S. T. Altunin and I. A. Buzunov [1], V. N. Sholokhov [2], A. M. Mukhamedov [4], and V. S. Lapshenkov [3], it was concluded that in the zone of additional backwater, the flow slope formed during sediment deposition is always smaller than the natural river slope in the same reach.

In nature, channel-forming sediments are divided into two fundamentally different sedimentation schemes: gravel–pebble deposits and sandy deposits. The process of sedimentation of upstream backwater reaches by gravel–pebble material occurs as follows [3, 4]. The accumulation of the coarsest sediments begins in the zone where the backwater curve meets the natural river water level; the finest fractions may either be immediately transported beyond the backwater reach (in the case of small backwater heads), or be deposited together with sandy fractions during the siltation process.

At the initial stage, the length of the sedimentation zone is small; later it increases, with both boundaries of the sedimentation reach shifting simultaneously: the downstream boundary moves toward the hydraulic structure, while the upstream boundary moves further upstream. As a result, the planform area of sedimentation expands, and the rate of bed aggradation decreases. Over time, a significant volume of sediment deposits accumulates within the accumulation zone in the form of channel features (islands). Therefore, sedimentation is accompanied by a considerable additional rise in water levels.

One of the main elements of the calculation is determining the location of the downstream boundary of the sedimentation reach. It is usually situated at the cross-section where siltation has almost ceased. In this case, gravel is also deposited within the zone of sand accumulation. The minimum diameter ($d_{\min}$) of gravel particles accumulating in the sedimentation reach can be determined by the following formula.

$$d_{\min} = 25,6 Q_p^{0,30} (pw)^{0,76} \quad (2)$$

where:

- pw - sediment load of the flow in suspended form;
- Q_p - design water discharge;
- D - particle size (mm), above which gravel particles are deposited upstream of the investigated cross-section (particles smaller than this size are accumulated together with sandy fractions).

The movement of the downstream boundary of the sedimentation reach toward the hydraulic structure is governed by siltation processes: where siltation has ended, sediment deposition begins. The estimation of sedimentation volumes is carried out based on cross-sectional areas defined at a given water level elevation by the topography of the cross-section, the silted area, and the water flow area.

To determine the cross-sectional area of the flow under natural sediment load conditions (at the downstream boundary section), the average flow depth is calculated using a formula derived from the equation of A. N. Gostunsky:

$$H = \left[\frac{3300 Q_p^3 n^p}{B^3 (pW)} \right] \quad (3)$$

The width of the flow is determined using the formula of S. T. Altunin:

$$B = (KH)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

In this case, for sandy deposits, ($K = 3.0$) and ($m = 0.5$) are adopted.

Then, for the same cross-section and water discharge, the flow cross-sectional area is determined under the assumption that particles with a diameter $d_{\min}$ are transported to the section.

The average depth is calculated using the formula of V. S. Lapshenkov:

$$H = \left[\frac{Q_p n^{\frac{2}{3}}}{B} \left(\frac{10}{d} \right)^{1/2} \right]^{\frac{1}{1+1/2y}} \quad (5)$$

The flow width can also be calculated using Altunin's formula.

Next, the sedimentation volume over the entire length of the additional backwater reach is determined for the specified calculation time interval:

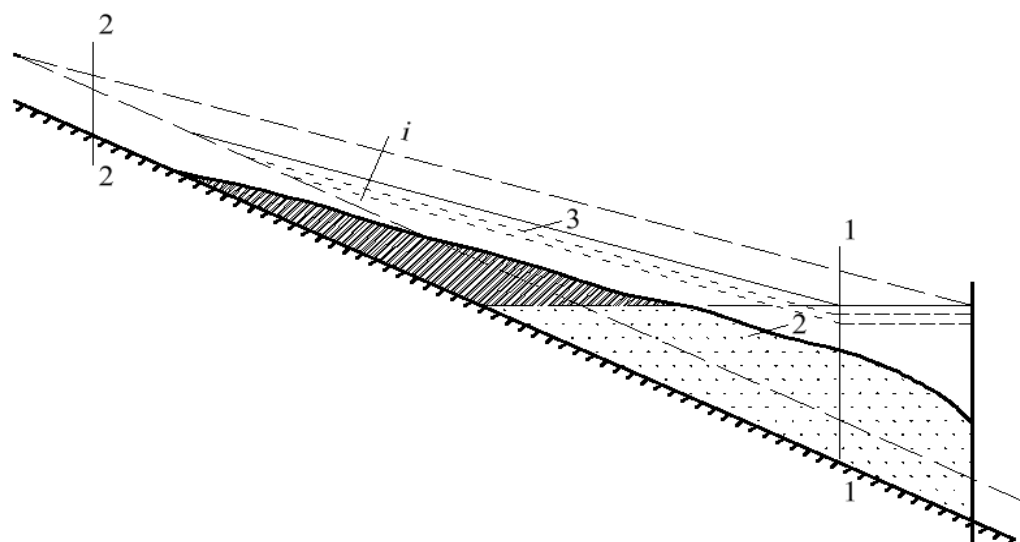
$$V_{\Sigma H} = \frac{G_{\partial} t}{\gamma_{\partial}} \quad (6)$$

where:

- G_{∂} - annual bed-load sediment discharge participating in sediment deposition;
- γ_{∂} - their bulk (volume) density;
- T - time from the beginning of sediment accumulation up to the moment when the downstream boundary of sedimentation reaches the design cross-section.

After this, sedimentation is calculated for the upper computational reach located upstream of the first one. Again, using the grain-size distribution curve, the armoring (coarse layer) diameter at the upstream cross-section is selected, and the water surface slope within the reach, as well as the flow depth and width, are determined. Finally, the sedimentation area and volume are computed.

Let us consider the sedimentation schemes of upstream backwater reaches formed by sandy sediments (figure). In this case, sedimentation occurs through the accumulation of particles smaller than 0.05–0.1 mm. An illustrative example is the Amu Darya River. The channel-forming sediments of this river consist of fractions of 0.1–0.5 mm. In the middle and lower reaches of the Amu Darya, the construction of the Kyzylayak Hydroscheme, Tuyamuyun Hydroscheme, and Takhiatash Hydroscheme was planned.



Scheme of sedimentation of backwater reaches by sandy deposits: 1- natural (pre-dam) water level; 2 - bed profile after siltation and sediment deposition; 3 - backwater curve after siltation and sediment deposition.

The Takhiatash Hydroscheme is located on a lowland reach of the Amu Darya River, which is characterized by a high concentration of suspended sediments and an unstable channel. The long-term average monthly turbidity ranges from 2 to 4 kg/m³, while the maximum observed discharge is 6,940 m³/s. The largest sediment particle size does not exceed 0.25 mm, with an average diameter of 0.12 mm. Bed-load sediments account for 8–10% of suspended sediments. The long-term average sediment transport (at Chatly) is 123 million tons per year. The channel slopes are relatively steep ($i = 0.00012\text{--}0.00016$), and the mean flow velocity reaches up to 2.5 m/s.

The hydroscheme was commissioned in 1974. During the periods 1974–1977, 1982–1986, and 1996–2000, field investigations were carried out by staff of SANIIRI (Central Asian Scientific Research Institute of Irrigation).

In the upstream reach, studies were conducted at 46 cross-sections over a length of 17.5 km, and in the downstream reach at 31 cross-sections over a length of 14 km [5]. The processes of siltation in the upstream reach and general channel scour in the downstream reach were investigated in order to assess the possible adverse impact of these morphological changes on water intake conditions for canals and on the operation of the hydroscheme as a whole.

Intensive morphological transformations of the upstream reach of the Takhiatash Hydroscheme continued for 10 years from the beginning of its operation. During this 10-year period, 21.67 million m³ of sediments were deposited in the upstream reach (the maximum silted volume), amounting to 48% of the total channel storage capacity formed at the normal water level (NWL) in the upstream reach. At the same time, intensive inflow of bed-load sediments and gradual aggradation of the channel bed in the downstream reach were observed.

Thus, after 1982, siltation of the upstream reach was completed and the process of sediment deposition began. The initial backwater length from the Takhiatash Hydroscheme (NWL 77.2 m) upstream was 17 km; as a result of sediment deposition by bed-load sediments, it increased to 70 km, i.e., by a factor of four.

Upstream of this hydroscheme, the Tuyamuyun Hydroscheme was commissioned in 1982. Above the Tuyamuyun gauging station, the river's suspended load contains a small amount of gravel, but its role in accumulation processes is minor; the channel-forming sediments are fractions of 0.1–0.5 mm. The initial backwater length from the Tuyamuyun Hydroscheme (NWL 130.0 m) upstream is 84 km, and during sedimentation by channel-forming sandy fractions it will reach 330 km, i.e., it will also increase by a factor of four [3].

Calculations of sedimentation under such conditions are of particular importance, since the resulting additional inundation may extend over large lengths and areas. In addition, the sediment regime near the hydroscheme and other water-intake structures in the upstream reach is of great interest.

In this scheme, the sedimentation reach increases in length over time; the movement of its downstream boundary toward the hydroscheme, as in the previous scheme, is determined through siltation calculations.

A characteristic feature of sedimentation that can be used in the computational scheme is that over a large part of the sedimentation reach, a slope close to the limiting value is established, which will persist for a very long time over the predominant length of the upstream backwater reach.

According to the exponential law describing both siltation and sedimentation processes, once 90–95% of the ultimately sedimentable volume has been deposited, the intensity of the accumulation processes sharply decreases. In this case, only about 5% of the sediments continue to settle, and these are retained for a very long time in the upstream reach, contributing to the formation of a wandering channel within the overall accumulation process. Such a nature of the process determines the values of the limiting channel slope.

The limiting slope is determined by the following formula [3]:

$$i = 0,00625 \frac{(pw)^{0,70}}{Q_p^{0,095}} \quad (7)$$

The sedimentation calculation is carried out starting from the cross-section where siltation has ended (figure, section I). Next, using formulas (3) and (4), the elements of the cross-sectional profile are determined, and based on the limiting slope i_{np} , the water level elevation and the connection between the backwater level and the natural river levels are established (figure, section 2). These parameters are sufficient to determine the sedimentation volume over a known period of sediment accumulation. This volume must be compared with the potential transport of channel-forming sediments over the same operational period.

REFERENCES

- [1] Altunin S. T. *Regulation of River Channels at Water Intakes*. Moscow: Selkhozgiz, 1956. 242 p.
- [2] Sholokhov V. N. On the formation of river channels in the reaches of low-head dams in mountainous and foothill river sections // *Proceedings of SANIIRI*. 1957. Issue 84. 38 p.
- [3] Lapshenkov V. S. *Forecasting Channel Deformations in the Reaches of River Hydroschemes*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 238 p.
- [4] Mukhamedov A. M. *Operation of Low-Head Hydroschemes on Sediment-Transporting Rivers*. Tashkent: Fan, 1976. 238 p.
- [5] Baymanov K. I. *Flows in Deformable Open Channels*. Nukus: Karakalpakstan, 2008. 352 p.
- [6] Baymanov K. I., Baimanov R.K. *A study of the dynamics of the flow and the round process in urbanized areas of plain rivers*. IOP Conference Series: Earth and Environmental., 2023, 1212(1), 012006.
- [7] Baymanov K. I., Baimanov R.K. *Investigation and Calculation of Channel Deformations in the Lower Reaches of Low-Head Hydraulic Structures of Lowland Rivers*. Power Technology and Engineering., 2024, 57(5), p.p. 680–689.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ MAPLE ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ КУРСА CALCULUS II.

Хасанова Д., Буриев А., Собиржонова М.

Университет мировой экономики и дипломатии.

Введение

Курс Calculus II занимает важное место в системе математической подготовки студентов технических и естественно-научных направлений. Разделы, связанные с определёнными и двойными интегралами, бесконечными рядами, численными методами и элементами многомерного анализа, являются основой для дальнейшего изучения математического моделирования, дифференциальных уравнений, вычислительной математики и прикладных дисциплин. Однако практика преподавания показывает, что многие темы Calculus II вызывают у студентов значительные трудности вследствие высокой степени абстрактности, сложной геометрической интерпретации и большого объёма вычислений.

В современных условиях цифровизации образования особую актуальность приобретают методы компьютерной визуализации и интерактивного моделирования математических объектов. Использование программных средств позволяет не только автоматизировать громоздкие вычисления, но и формировать наглядное представление о геометрическом и физическом смысле математических понятий. Особенно важную роль визуализация играет при изучении кратных интегралов, поверхностей, объёмов тел вращения, а также вопросов сходимости функциональных и числовых рядов.

Одной из наиболее эффективных систем компьютерной математики является Maple, обладающая широкими возможностями символьных вычислений, численного анализа и построения двумерных и трёхмерных графиков. Средства Maple позволяют выполнять аналитические преобразования, реализовывать численные методы, проводить вычислительные эксперименты и визуализировать результаты в интерактивной форме. Благодаря этому появляется возможность повысить качество усвоения сложных разделов Calculus II и усилить исследовательский компонент обучения.

В настоящее время особое внимание уделяется интеграции вычислительных технологий в образовательный процесс, однако вопросы совместного использования численного моделирования и визуализации при изучении задач Calculus II требуют дальнейшего исследования. Недостаточно изученными остаются методы сравнительного анализа аналитических и численных решений с использованием современных программных средств, а также влияние графической интерпретации на понимание математических моделей.

Целью данной работы является исследование возможностей системы Maple для визуализации и численного моделирования задач курса Calculus II. В работе рассматриваются методы графического представления интегральных и рядовых моделей, исследуются численные методы вычисления интегралов и анализируется эффективность визуального подхода при изучении математических объектов.

Научная новизна работы заключается в применении комплексного подхода, основанного на совместном использовании численного моделирования и интерактивной визуализации средствами Maple для исследования задач Calculus II. Проведён сравнительный анализ аналитических и численных методов решения интегральных задач с визуальным представлением результатов вычислительных экспериментов.

1. Теоретические основы задач Calculus II

Определённые интегралы и их геометрическая интерпретация

Одним из основных разделов Calculus II является теория определённого интеграла. Определённый интеграл используется для вычисления площади криволинейной трапеции, длины дуги, объёма тел вращения, работы силы и других физических величин. В общем виде определённый интеграл записывается следующим образом:

$$I = \int_a^b f(x)dx$$

Геометрический смысл определённого интеграла заключается в вычислении площади фигуры, ограниченной графиком функции, осью абсцисс и прямыми $x=a$ и $x=b$.

При изучении данной темы студенты часто сталкиваются с трудностями при понимании геометрического смысла интеграла. Использование Maple позволяет визуализировать подынтегральную функцию и область интегрирования, что значительно облегчает восприятие материала.

Maple-код построения графика функции

```
with(plots):
plot(x^2, x=0..2, filled=true);
```

Построение графиков позволяет наглядно представить площадь под кривой и интерпретировать процесс интегрирования как суммирование бесконечно малых площадей.

Двойные интегралы и трёхмерная визуализация

Двойные интегралы являются важным инструментом многомерного анализа и широко применяются при вычислении объёмов тел, масс неоднородных пластин и других физических характеристик.

Общий вид двойного интеграла:

$$I = \iint Df(x,y)dx dy.$$

В данной работе рассматривается функция:

$$z = \sin(x) \cos(y)$$

Использование Maple позволяет строить трёхмерные поверхности, отображающие поведение функции в пространстве.

Maple-код построения поверхности

```
plot3d(sin(x)*cos(y), x=-Pi..Pi, y=-Pi..Pi,
axes=boxed, labels=[x,y,z]);
```

Трёхмерная визуализация способствует формированию пространственного мышления и позволяет лучше понять геометрический смысл кратных интегралов.

Числовые ряды и исследование сходимости

Важным разделом Calculus II является теория числовых рядов. Одной из основных задач является исследование сходимости ряда и анализ поведения его частичных сумм.

Рассмотрим гармонический знакочередующийся ряд:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$$

Для исследования сходимости ряда используются графики частичных сумм.

Maple-код построения графика частичных сумм

```
with(plots):
S:=n->sum((-1)^k/k,k=1..n):
pointplot([seq([n,evalf(S(n))],n=1..30)],
symbol=solidcircle);
```

Визуальный анализ позволяет проследить скорость сходимости ряда и исследовать колебательный характер последовательности частичных сумм.

Численные методы решения дифференциальных уравнений

а) Метод Эйлера

Одним из наиболее простых и широко применяемых численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений является метод Эйлера. Данный метод позволяет получать приближённое решение задачи Коши путём последовательного вычисления значений функции на дискретной сетке.

Рассмотрим задачу Коши:

$$\frac{dy}{dx} = x + y, y(0) = 1.$$

Точное решение данной задачи имеет вид:

$$y = 2e^x - x - 1.$$

Формула метода Эйлера записывается следующим образом:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n).$$

Использование Maple позволяет автоматизировать вычисления и визуализировать процесс построения приближённого решения.

Maple-код метода Эйлера

```
f:=(x,y)->x+y;
h:=0.1;
x:=0;
y:=1;
for i from 1 to 10 do
  y:=evalf(y+h*f(x,y));
  x:=x+h;
  print(x,y);
end do;
```

Метод Эйлера отличается простотой реализации, однако при больших шагах вычислений может возникать заметная погрешность.

б) Метод Рунге–Кутты четвёртого порядка

Для повышения точности вычислений применяется метод Рунге–Кутты четвёртого порядка. Данный метод обеспечивает высокую точность приближённого решения и широко используется при численном моделировании математических процессов.

Для задачи

$$\frac{dy}{dx} = x + y, y(0) = 1$$

Формулы метода Рунге-Кутты имеют вид:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_n, y_n), \\ k_2 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right), \\ k_3 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right), \\ k_4 &= f(x_n + h, y_n + hk_3). \end{aligned}$$

Тогда

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Метод Рунге–Кутта обеспечивает значительно более высокую точность по сравнению с методом Эйлера.

```

f:=(x,y)->x+y:
h:=0.1:
x:=0:
y:=1:
for i from 1 to 10 do
  k1:=f(x,y);
  k2:=f(x+h/2,y+h*k1/2);
  k3:=f(x+h/2,y+h*k2/2);
  k4:=f(x+h,y+h*k3);
  y:=evalf(y+h*(k1+2*k2+2*k3+k4)/6);
  x:=x+h;
  print(x,y);
end do:

```

Вычислительные эксперименты

Для анализа эффективности численных методов были проведены вычислительные эксперименты.

Таблица 1. Сравнение численных методов решения дифференциального уравнения

x	Точное решение	Метод Эйлера	Метод Рунге–Кутта	Погрешность Эйлера	Погрешность Рунге–Кутта
0.2	1.6428	1.6200	1.6428	0.0228	0.0000
0.4	2.5836	2.5320	2.5836	0.0516	0.0000
0.6	3.8442	3.7569	3.8442	0.0873	0.0000
0.8	5.4511	5.3194	5.4510	0.1317	0.0001
1.0	7.4366	7.2486	7.4365	0.1880	0.0001

Полученные результаты показывают, что метод Рунге–Кутта четвертого порядка обладает значительно более высокой точностью по сравнению с методом Эйлера. При увеличении шага вычислений погрешность метода Эйлера возрастает быстрее, тогда как метод Рунге–Кутта сохраняет высокую точность приближённого решения.

Заключение

В данной работе исследованы возможности системы Maple при изучении задач курса Calculus II. Рассмотрены методы визуализации определённых и двойных интегралов, исследование сходимости числовых рядов, а также численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Особое внимание уделено применению методов Эйлера и Рунге–Кутта четвертого порядка для решения задачи Коши. Проведён сравнительный анализ точности численных методов и выполнены вычислительные эксперименты средствами Maple.

Результаты исследования показали, что метод Рунге–Кутта обеспечивает более высокую точность по сравнению с методом Эйлера, а использование Maple позволяет эффективно визуализировать результаты вычислений и исследовать поведение решений дифференциальных уравнений.

Установлено, что применение компьютерной визуализации способствует лучшему пониманию математических моделей, развитию исследовательских навыков и повышению эффективности изучения сложных разделов высшей математики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с использованием интерактивных технологий, элементов искусственного интеллекта и анимационного моделирования при изучении задач математического моделирования и вычислительной математики.

Список литературы

1. Stewart J. Calculus: Early Transcendentals. — Boston: Cengage Learning, 2021.
2. Anton H., Bivens I., Davis S. Calculus. — Wiley, 2020.
3. Boyce W., DiPrima R. Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems. — Wiley, 2021.
4. Maple User Manual. Waterloo Maple Inc., 2024.
5. Weisstein E. W. CRC Concise Encyclopedia of Mathematics. — CRC Press, 2022.
6. Burden R., Faires J. Numerical Analysis. — Brooks/Cole, 2021.
7. Kreyszig E. Advanced Engineering Mathematics. — Wiley, 2020.
8. Strang G. Computational Science and Engineering. — Wellesley-Cambridge Press, 2021.
9. Press W. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. — Cambridge University Press, 2020.
10. Zill D. Advanced Engineering Mathematics. — Jones & Bartlett Learning, 2022.
11. Chapra S. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists. — McGraw-Hill, 2021.
12. Arfken G., Weber H. Mathematical Methods for Physicists. — Academic Press, 2020.
13. Mathews J., Fink K. Numerical Methods Using MATLAB. — Pearson, 2021.
14. Kiusalaas J. Numerical Methods in Engineering with Python. — Cambridge University Press, 2022.
15. Ablowitz M., Fokas A. Complex Variables and Applications. — Cambridge University Press, 2021.

[DOI 10.5281/zenodo.20236622](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236622)

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПЕРЕМЕЩАЕМЫХ УЗЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

Хасанова Д.

Университет мировой экономики и дипломатии.

Аннотация. В статье представлен обзор исследований, посвящённых развитию метода перемещаемых узлов (МПУ) для решения обыкновенных и частных дифференциальных уравнений. Рассматриваются работы, связанные с построением явных разностных схем, исследованием приближённо-аналитических решений параболических уравнений, уточнением решений краевых задач, а также применением метода к уравнению Блэка–Шоулза и задачам гидродинамики. Проведён анализ основных результатов, преимуществ метода и направлений дальнейших исследований. Показано, что метод перемещаемых узлов позволяет получать устойчивые и достаточно точные приближённые решения при сравнительно низких вычислительных затратах.

Ключевые слова: метод перемещаемых узлов, параболические уравнения, разностные схемы, задача Дирихле, уравнение Блэка–Шоулза, численные методы, приближённо-аналитические решения.

1. Введение.

Современные задачи вычислительной математики, математической физики, гидродинамики и финансовой математики требуют разработки эффективных методов решения дифференциальных уравнений. Классические численные методы, такие как метод конечных разностей, метод конечных элементов и спектральные методы, обладают высокой точностью, однако во многих случаях сопровождаются значительными вычислительными затратами или сложностью реализации при нелинейных и сложных граничных задачах. Одним из перспективных направлений является метод перемещаемых узлов (МПУ), основанный на специальном выборе сеточных точек и построении приближённых схем с

адаптивной структурой. Данный подход позволяет повысить точность аппроксимации и улучшить свойства разностных схем.

Исследования, посвящённые МПУ, охватывают широкий круг задач:

- обыкновенные дифференциальные уравнения;
- параболические уравнения;
- краевые задачи типа Дирихле;
- задачи гидродинамики;
- финансовые модели, основанные на уравнении Блэка–Шоулза.

Цель данной обзорной статьи — систематизировать основные результаты совместных исследований Далабаева У. и Хасановой Д., проанализировать развитие метода перемещаемых узлов и определить перспективы его дальнейшего применения.

2. Развитие метода перемещаемых узлов для ОДУ

Начнём обзор, посвящённых исследованию МПУ для обыкновенных дифференциальных уравнений:

The Approximation Error of Ordinary Differential Equations Based on the Moved Node Method // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. Vol. 10. P. 2450–2458.

A New Approach to Calculating the Approximation Error of Ordinary Differential Equations Research Highlights in Mathematics and Computer Science Vol. 5 5, 1-13. 2023

В данных работах исследовались краевые задачи для уравнения конвекции-диффузии и сингулярных возмущённых уравнений. Были получены решения ОДУ при использовании перемещаемых узлов.

3. Решение задачи Дирихле методом перемещаемых узлов

Дальнейшее развитие данного направления было представлено в работе:

Dalabaev U., Khasanova D. An Explicit Expression of Ordinary Difference Schemes for Differential Equations by the Moved Node Method // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3004. 060043.

В статье рассмотрены решения задачи Дирихле для задачи эллиптического типа на основе МПУ.

В тезисах:

Refinement of the Solution of the Dirichlet Problem by the Method of Moving Nodes // APAMIT-2024, а также в статье:

Решение задачи Дирихле методом перемещаемого узла // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2026. № 1(71).

Было рассмотрено улучшение метода МПУ, рассмотрена комбинация данного метода с методом прямых. В качестве применения рассмотрены задачи гидродинамики

В работе:

Engineering Method for Calculating Fluid Flow in Pipes with Different Cross Sections in Energy and Technological Processes // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 371. 03021.

метод использовался при исследовании течения жидкости в трубах различного поперечного сечения и данный момент продолжаем исследования в данной области

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных методов: в энергетических системах; технологических процессах; инженерных расчётах трубопроводов.

4. Применение МПУ к параболическим уравнениям

В работе:

Construction of an Approximate-Analytical Solution for Boundary Value Problems of a Parabolic Equation // Mathematics and Computer Science. 2023. Vol. 8(2). P. 39–45.

было предложено построение приближённо-аналитического решения краевой задачи для параболического уравнения.

Продолжением данного направления стали исследования:

Comparative Analysis of Schemes with Movable Nodes for a Parabolic Equation // European Journal of Applied Sciences. 2024. Vol. 12(6).

Improving the Approximate Analytical Solution of a Parabolic Equation Using Movable Nodes // APAMIT-2024.

В этих работах были рассмотрены схемы с одним узлом, далее композиция данного метода с методом прямых, и построение схем с несколькими перемещаемыми узлами.

Отдельное направление исследований связано с применением метода перемещаемых узлов в финансовой математике.

В работах:

Применение метода перемещаемых узлов к задаче оценки стоимости европейских опционов // SAMEIR-2026.

Приближённое решение уравнения Блэка–Шоулза с помощью метода перемещаемого узла // BDAIM. 2025.

исследовалось применение МПУ к уравнению Блэка–Шоулза.

Заключение

Проведённый обзор исследований Далабаева У. и Хасановой Д. показывает последовательное развитие метода перемещаемых узлов. Применение решения сложных задач математической физики, гидродинамики и финансовой математики.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития метода перемещаемых узлов и его применения к многомерным и нелинейным задачам.

Литература

1. Dalabaev U., Hasanova D. The Approximation Error of Ordinary Differential Equations Based on the Moved Node Method // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. Vol. 10. P. 2450–2458.
2. Dalabaev U., Hasanova D. Construction of an Approximate-Analytical Solution for Boundary Value Problems of a Parabolic Equation // Mathematics and Computer Science. 2023. Vol. 8(2). P. 39–45.
3. Dalabaev U., Hasanova D. Engineering Method for Calculating Fluid Flow in Pipes with Different Cross Sections in Energy and Technological Processes // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 371. 03021.
4. Dalabaev U., Khasanova D. An Explicit Expression of Ordinary Difference Schemes for Differential Equations by the Moved Node Method // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3004. 060043.
5. Dalabaev U., Xasanova D. Comparative Analysis of Schemes with Movable Nodes for a Parabolic Equation // European Journal of Applied Sciences. 2024. Vol. 12(6).
6. Dalabaev U., Khasanova D. Improving the Approximate Analytical Solution of a Parabolic Equation Using Movable Nodes // APAMIT-2024.
7. Dalabaev U., Khasanova D. Refinement of the Solution of the Dirichlet Problem by the Method of Moving Nodes // APAMIT-2024.
8. Далабаев У., Хасанова Д. Приближённое решение уравнения Блэка–Шоулза с помощью метода перемещаемого узла // BDAIM. 2025.
9. Далабаев У., Хасанова Д. Применение метода перемещаемых узлов к задаче оценки стоимости европейских опционов // SAMEIR-2026.
10. Далабаев У., Хасанова Д. Решение задачи Дирихле методом перемещаемого узла // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2026. № 1(71).
11. D Umuridin, H Dilfuza, A New Approach to Calculating the Approximation Error of Ordinary Differential Equations Research Highlights in Mathematics and Computer Science Vol. 5, 1-13. 2023

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕМЕЩАЕМОГО УЗЛА И МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ БЛЭКА–ШОУЛЗА

Далабаев У., Хасанова Д., Абилаева С.

Университет мировой экономики и дипломатии.

Аннотация. В данной работе рассматривается численное решение уравнения Блэка–Шоулза методом перемещаемого узла (МПУ) и методом Монте-Карло. Выполнено сравнение результатов с точным аналитическим решением. Проведён анализ абсолютной ошибки и среднеквадратичной ошибки RMSE. Численные эксперименты показывают, что метод перемещаемого узла обеспечивает более высокую точность и устойчивость вычислений.

Ключевые слова: уравнение Блэка–Шоулза, метод перемещаемого узла, метод Монте-Карло, финансовая математика.

1. Введение.

Развитие современных финансовых рынков приводит к необходимости построения эффективных математических моделей для оценки стоимости производных финансовых инструментов. Одной из наиболее известных моделей в финансовой математике является модель Блэка–Шоулза, позволяющая определить стоимость европейских опционов на основе дифференциального уравнения параболического типа.

Несмотря на существование аналитического решения уравнения Блэка–Шоулза, практические задачи финансовой инженерии часто сопровождаются сложными начальными и граничными условиями, что делает применение точных методов затруднительным. В связи с этим особую актуальность приобретают численные методы решения, обеспечивающие необходимую точность и устойчивость вычислений.

В последние годы значительный интерес представляют безсеточные и адаптивные методы, позволяющие более эффективно учитывать особенности исследуемого процесса. Одним из таких подходов является метод перемещаемого узла (МПУ), основанный на динамическом распределении вычислительных узлов в области решения. Данный метод позволяет повысить точность аппроксимации и уменьшить вычислительные затраты при решении параболических уравнений.

Наряду с детерминированными численными методами в финансовой математике широко используется метод Монте-Карло, основанный на статистическом моделировании случайных процессов. Преимуществом данного метода является универсальность и возможность применения к широкому классу стохастических задач. Однако достижение высокой точности требует моделирования большого числа траекторий, что приводит к увеличению времени вычислений.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ метода перемещаемого узла и метода Монте-Карло при решении уравнения Блэка–Шоулза. Выполняется сравнение приближённых решений с точным аналитическим решением, исследуются абсолютные ошибки и среднеквадратичные отклонения, а также анализируется эффективность рассматриваемых методов.

2. Постановка задачи

Рассмотрим классическое уравнение Блэка–Шоулза, приведённое к уравнению типа теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(x, 0) = u^0(x) = e^{-\alpha x} \max(e^x - 1, 0)$$

$$u(W, \tau) = u_W = 0, \quad u(E, \tau) = u_E = 0. \quad (2)$$

Уравнение (1) и условия (2) будем называть задачей 1.

Задачу 1 решим методом перемещаемого узла и методом Монте-Карло, и сравним результаты с точным аналитическим решением.

3. Метод перемещаемого узла

Обозначим через $U(x, \tau)$ приближенное аналитическое решение задачи 1, которое получено с помощью метода перемещаемого узла, где использованы граничные и начальное условия.

Если произведем аппроксимацию по неявной схеме МПУ, получим

$$\frac{U(x, \tau) - U^0(x)}{\tau} = \frac{2}{E - W} \left(\frac{U_E(\tau) - U(x, \tau)}{E - x} - \frac{U(x, \tau) - U_W(\tau)}{x - W} \right) \quad (3)$$

Решая это, уравнение получим приближенно-аналитическое решение задачи 1

$$U(x, t) = \frac{(E - x)(x - W)}{2\tau + (E - x)(x - W)} U^0(x) + \frac{2\tau[U_E(\tau)(x - W) + U_W(\tau)(E - x)]}{2\tau + (E - x)(x - W)} \quad (4)$$

где

$$u(x, 0) = u^0(x) = e^{-\alpha x} \max(e^x - 1, 0)$$

$$u(W, \tau) = u_W = 0, \quad u(E, \tau) = u_E = 0.$$

4. Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло основан на моделировании большого числа случайных траекторий цены базового актива. Цена актива моделируется согласно геометрическому броуновскому движению:

$$S_T = S_0 \exp \left(\left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) T + \sigma \sqrt{T} Z \right), \quad \text{где } Z \sim N(0, 1)$$

Цена европейского опциона определяется по формуле:

$$C = e^{-rT} \left(\frac{1}{N} \right) \Sigma \max(S_T^i - K, 0)$$

где

C - цена европейского опциона,

N - число траекторий,

S_T^i - значение цены актива в момент времени T для i -ой траектории,

K - цена исполнения опциона.

5. Численные эксперименты

Для анализа были использованы три набора коэффициентов. Выполнено сравнение точного решения, метода МПУ и метода Монте-Карло. Были вычислены абсолютные ошибки и RMSE. Для анализа были использованы три набора коэффициентов.

Точное решение задачи 1 имеет вид

$$u(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \int_0^{+\infty} e^{-\alpha\xi} (e^\xi - 1) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\tau}} d\xi \quad (5)$$

которое приводится к виду

$$u(x, \tau) = e^{-\alpha x + \alpha^2 \tau} F(d_1) - e^{-(\alpha+1)x + (\alpha+1)^2 \tau} F(d_2)$$

$$d_1 = \frac{x + (2\alpha+1)\tau}{\sqrt{2\tau}} + \frac{\sqrt{\tau}}{2}, \quad d_2 = \frac{x + (2\alpha+1)\tau}{\sqrt{2\tau}} - \frac{\sqrt{\tau}}{2},$$

где F - функция нормального распределения.

Далее в таблице 1 представлены 3 задачи с различными данными коэффициентов.

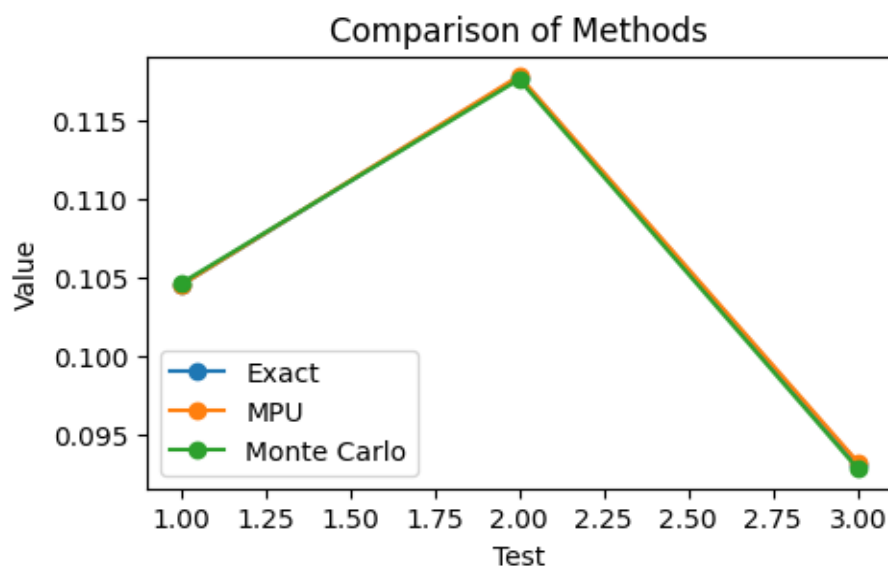
Табл. 1

№ задачи	K	r	sigma	T
1	1.0	0.05	0.2	1
2	0.6	0.20	0.2	1
3	1.2	0.03	0.25	0.5

В таблице 2 представлены результаты сравнений приближённых решений с точными, для сравнения используем среднее квадратичное отклонение.

Табл.2

Задача	Точное	МПУ	Monte Carlo	Ошибка МПУ	Ошибка МС
1	0.104506	0.104499	0.104624	0.000007	0.000118
2	0.117779	0.117871	0.117645	0.000092	0.000135
3	0.093123	0.093234	0.092808	0.000111	0.000315



6. Анализ результатов

Проведённые численные эксперименты показывают, что метод перемещаемого узла обеспечивает более высокую точность по сравнению с методом Монте-Карло. При этом МПУ демонстрирует устойчивость вычислений и меньшую зависимость от случайных факторов. Метод Монте-Карло показывает хорошие результаты при большом количестве траекторий, однако для повышения точности требуется увеличение вычислительных затрат. Таким образом, метод перемещаемого узла может рассматриваться как эффективный инструмент численного решения уравнения Блэка–Шоулза.

7. Заключение

В данной работе было проведено сравнение метода перемещаемого узла и метода Монте-Карло при решении уравнения Блэка–Шоулза.

Проведённые численные эксперименты показали:

- метод перемещаемого узла обеспечивает высокую точность приближённого решения;
- значения МПУ ближе к точному решению по сравнению с методом Монте-Карло;
- среднеквадратичная ошибка МПУ меньше, чем у метода Монте-Карло;
- метод перемещаемого узла демонстрирует устойчивость и эффективность при решении задач финансовой математики.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения метода перемещаемого узла для численного решения параболических уравнений.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum (U_{exact} - U_{approx})^2}$$

Литература

1. Black F., Scholes M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities // Journal of Political Economy. — 1973. — Vol. 81. — P. 637–654.
2. Merton R. Theory of Rational Option Pricing // Bell Journal of Economics. — 1973. — Vol. 4. — P. 141–183.
3. Hull J. Options, Futures and Other Derivatives. — Pearson Education, 2018.
4. Wilmott P. Paul Wilmott on Quantitative Finance. — John Wiley & Sons, 2006.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. — Москва: Наука, 1989.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — Москва: Наука, 1977.
7. U.Dalabaev, D.Xasanova. Comparative Analysis of Schemes with Movable Nodes for a Parabolic Equation. European Journal of Applied Sciences – Vol. 12, No. 6. Publication Date: December 25.12. 2024. DOI:10.14738/aivp.126.17966
8. Dalabaev Umuridin, Hasanova Dilfuza. Construction of an Approximate-Analytical Solution for Boundary Value Problems of a Parabolic Equation. Mathematics and Computer Science. Vol. 8, No. 2, 2023, pp. 39-45. doi: 10.11648/j.mcs.20230802.11

[DOI 10.5281/zenodo.20225392](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225392)

Integrated Hydro-Optimization and Simulation Frameworks for Resilient Water Governance in Hyper-Arid Environments.

Hokimjonova Zarnigora¹, Akabirkhodjaeva Dilduza²

¹University of World Economy and Diplomacy

²University of World Economy and Diplomacy

z.hokimjonova@gmail.com¹, dilduzaakabirxodjayeva@gmail.com²

Abstract

Water scarcity has become one of the most significant environmental and socio-economic challenges in arid and semi-arid regions. Sustainable management of limited water resources requires integrated planning approaches capable of balancing agricultural production, ecological preservation, and economic development. This study examines a coupled optimization–simulation framework based on the Water Evaluation and Planning (WEAP) system integrated with a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). The research focuses on the Sistan region in southeastern Iran and evaluates trade-offs between agricultural profitability and environmental sustainability. Hydrological, agricultural, climatic, and socio-economic data were analyzed over a thirty-year period. Results demonstrate that multi-objective optimization improves ecological outcomes while maintaining acceptable economic benefits. The findings confirm that integrated simulation–optimization approaches provide effective tools for sustainable water resources management in water-scarce regions.

Keywords: sustainable water management, WEAP, optimization, arid regions, ecosystem services.

Introduction

Water scarcity is among the major global challenges affecting environmental sustainability and socio-economic development. Arid and semi-arid regions are particularly vulnerable because water demand often exceeds renewable supply [2]. Population growth, climate change, and inefficient water allocation practices have intensified pressure on freshwater resources.

The Sistan region in southeastern Iran represents one of the most water-stressed areas in the Middle East. The region depends heavily on the Hirmand River, which supplies water for agriculture, domestic consumption, and the Hamoun wetland ecosystem [3]. Declining river inflows and prolonged droughts have severely affected agricultural productivity and environmental stability.

Integrated water resources management approaches are increasingly used to address these challenges. Combining simulation and optimization techniques allows decision-makers to evaluate trade-offs between competing sectors and identify sustainable allocation strategies [3].

Literature Review

Simulation models such as WEAP, MODSIM, and MIKE BASIN have been widely applied for river basin management and water allocation studies [4]. Among these systems, WEAP is recognized for its flexibility, user-friendly interface, and ability to incorporate socio-economic and environmental factors. Metaheuristic optimization algorithms including Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization have also become important tools for solving complex water allocation problems [5]. Multi-objective optimization methods are particularly useful when balancing conflicting goals such as agricultural profitability and ecosystem preservation.

Previous studies successfully linked WEAP with optimization models to improve water management efficiency. However, relatively few studies explicitly included environmental economic valuation and ecosystem services within optimization frameworks [6].

Methodology

The study applied a coupled simulation–optimization framework integrating WEAP and a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). WEAP simulated hydrological processes, agricultural demand, reservoir operation, and environmental flows. MOGA generated optimal water allocation and cropping scenarios.

Two objective functions were considered:

1. Maximization of economic benefits derived from agriculture and wetland ecosystem services.
2. Maximization of environmental water allocation to the Hamoun wetland.

Hydrological conditions were classified using the Streamflow Drought Index (SDI), dividing years into non-drought, mild drought, severe drought, and extreme drought categories. The optimization process generated adaptive cropping patterns and environmental allocation strategies for each hydrological condition.

Historical data covering approximately thirty years were used for model calibration and validation [7].

WEAP Simulation Framework

The Water Evaluation and Planning (WEAP) system, developed by the Stockholm Environmental Institute (SEI), serves as the primary simulation tool for this research. Built upon the fundamental principle of water balance, WEAP is capable of modeling diverse components of a water system, such as supply sources, rainfall-runoff processes, multi-sectoral demands, water quality parameters, and specific operational constraints. Its comprehensive and intuitive design enables active participation from various stakeholders, including water resource managers, during the modeling phase [8].

In this study, the WEAP model integrates several critical data layers, including the physical and operational characteristics of reservoirs, hydrological variables, land use patterns, crop specifications, climatic data, and demographic trends. The Hirmand River basin in Iran is represented through three distinct agricultural catchment nodes, established based on the layout of supply channels and drainage networks. Each catchment node is further disaggregated by individual crop categories. Due to the region's hyper-arid climate, with annual precipitation averaging only 50 mm, and the absence of high-resolution datasets, the 'Irrigation Demands Method' within the 'Simplified Coefficient Approach' was selected to simulate hydrological processes. This method evaluates crop water requirements by assuming simplified agro-hydrological dynamics, specifically focusing on precipitation, evapotranspiration, and rain-fed agricultural contributions.

Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)

The multi-objective optimization problem is addressed using a MOGA implemented in MATLAB [1]. This approach combines several objective functions into a single scalar fitness value through a weighted-sum technique. Unlike conventional methods with fixed weights, the MOGA assigns random weights to the objective functions during each selection process, causing the search trajectory to vary throughout the optimization.

In the MOGA framework, a collection of Pareto-optimal solutions, referred to as the “tentative set,” is continuously maintained. From this set, only a limited number of superior individuals are preserved as elite solutions and transferred to the next generation.

The algorithm is composed of several main stages, including initialization, evaluation, selection, mutation, elitism, termination testing, and user selection. These stages are summarized below:

- **Initialization:** A starting population containing a predefined number of candidate solutions ($N_{pop}=500$, $N_{\{pop\}} = 500$, $N_{pop}=500$) is randomly generated.
- **Evaluation:** In this phase, objective-function values are computed for every candidate solution, and the tentative Pareto-optimal solution set is updated accordingly. At this stage, the optimization algorithm operates in conjunction with the WEAP software.
- **Selection:** The fitness value of each candidate solution is assessed. Subsequently, $N_{pop}/2$ pairs of individuals are selected from the population according to a specified selection probability. The selection probability $P(x)$ for a solution x within the population pop is calculated as follows:

$$P(x) = (f(x) - f_m(pop)) / \left(\sum_{x \in pop} f(x) - f_m(pop) \right)$$

where $f(x)$ is the scalar fitness (i.e., objective) function consisting of weighted sum of the objective functions F_1 and F_2 , and x contains the decision variables:

$$f_m(x) = m\{f(x) | x \in pop\}$$

- **Crossover:** For each selected pair, two new strings are generated using the crossover operation.

In this way, N_{pop} new strings are generated at this step.

- **Mutation:** For a small sample of strings produced in the previous step, a mutation operation with a predetermined mutation probability is used.
- **Elitist strategy:** N_{elite} strings produced by the jump operation are randomly removed and replaced by N_{elite} strings randomly selected from a tentative set of Pareto-optimal solutions.
- **Termination test:** If predetermined stopping criteria are not satisfied, the algorithm will return to the evaluation step.
- **User selection:** The final set of Pareto-optimal solutions is shown to the decision makers (DMs). A selection of the solutions is carried out based on the preferences of DMs and stakeholders and the problem condition.

Results and Discussion

The WEAP model demonstrated good calibration and validation performance. Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) values ranged from 0.70 to 0.93, indicating acceptable predictive capability [8].

Optimization results produced a Pareto front representing trade-offs between economic and environmental objectives. The purely economic scenario increased agricultural profits but significantly reduced environmental flows to the Hamoun wetland. In contrast, the multi-objective scenario achieved a more balanced allocation strategy.

During severe and extreme drought years, agricultural cultivation was significantly reduced to preserve domestic water supply and minimum environmental flows. Water-intensive crops such as melon were restricted under environmentally balanced scenarios. These findings demonstrate that adaptive cropping policies can improve both agricultural efficiency and ecological sustainability.

The study also highlighted the environmental importance of maintaining wetland inflows for reducing dust storms, preserving biodiversity, and supporting fisheries.

Conclusion

This study investigated sustainable water resources management in the Sistan region using a coupled WEAP–MOGA framework. The results demonstrated that integrated simulation–optimization approaches effectively support decision-making in complex water allocation systems.

The findings revealed that multi-objective optimization improves environmental sustainability while maintaining acceptable agricultural profitability. Adaptive cropping patterns based on hydrological conditions can significantly enhance water-use efficiency.

The proposed framework provides a practical decision-support tool for policymakers and water managers in arid regions. Future studies should incorporate climate change projections and groundwater interactions to improve long-term sustainability planning.

References

- [1] Deb, K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2001.
 - [2] United Nations. Sustainable Development Goals Report. New York: United Nations, 2019.
 - [3] Farrokhzadeh, S., Monfared, S.A.H., Azizyan, G., Shahraki, A.S., Ertsen, M.W., Abraham, E. Sustainable Water Resources Management in an Arid Area Using a Coupled Optimization–Simulation Modeling. *Water*, 2020, 12(3), 885.
 - [4] Gleick, P.H. *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press, 1993.
 - [5] Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A. WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Water International, 2005.
 - [6] Reed, P., Minsker, B. Groundwater Monitoring Design for Conflicting Objectives. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004.
 - [7] Barbier, E.B. Valuing Ecosystem Services as Productive Inputs. *Economic Policy*, 2007.
-

[8] Stockholm Environment Institute. WEAP System User Guide. Stockholm Environment Institute, 2016.

[9] Moriasi, D.N., et al. Model Evaluation Guidelines for Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 2007.

[DOI 10.5281/zenodo.20225076](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225076)

SUV TAQSIMOTINI AVTOMATLASHTIRISHDA GIBRID (MPC+RL) YONDASHUV

Seytimbetov Dauletyar Mambetyarovich, Tashkent Perfect-university
Allamuratova Nilufar Kuat qizi, EMU university

ANNOTATSIYA

Markaziy Osiyo va dunyo suv xo'jaligida kuzatilayotgan suv taqsimoti muammolarini hal etishda irrigatsiya tizimlarida suv yo'qotishlarini minimallashtirish hamda iste'molchilar ehtiyojini to'liq qondirish maqsadida suv resurslarini optimal boshqarish shartlarini ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi amaliyotda uchraydigan diskret suv ta'minoti sharoitida resurslarni optimallashtirish va maxsus algoritmik modellarni yaratishdan iborat.

Tadqiqotda kanallardagi suvning o'rnatilmagan harakatini va makon hamda vaqt bo'yicha o'zgarishini ifodalovchi taqsimlangan parametrlilik dinamik modellar, xususan, Sen-Venan tenglamalari asos qilib olingan. Suv oqimini real vaqt sharoitida boshqarish va noaniqliklarga moslashish maqsadida klassik optimallashtirish hamda intellektual o'rganuvchi usullarni birlashtiruvchi gibrid model qo'llanilgan. Bunda prognozli boshqaruv (Model Predictive Control — MPC) va mustahkamlovchi o'rganish (Reinforcement Learning — RL) algoritmlarining integratsiyasidan foydalanilgan.

Ishlab chiqilgan gibrid optimal boshqaruv tizimi (MPC+RL) an'anaviy qoida-asoslangan tizimlarga nisbatan o'zgaruvchan muhit sharoitlarida yuqori moslashuvchanlikni namoyish etdi. Gibrid model o'zida global optimallik va real vaqtga moslashuvchanlikni birlashtirgani tufayli, tizimning barqarorligini va suv taqsimoti samaradorligini sezilarli darajada oshirishi hamda suv yo'qotishlarini kamaytirishi isbotlandi.

KIRISH

So'nggi yillarda butun dunyoda, xususan, Markaziy Osiyo mamlakatlarida suv xo'jaligi tizimlarining kompyuterlashtirilishi jarayoni jadal rivojlanmoqda. O'zbekistonda ham irrigatsiya tizimlarida suv sarfini real vaqt rejimida monitoring qilish, avtomatik boshqaruv tizimlari va dasturiy majmualar yaratish yo'nalishidagi izlanishlar suv xo'jaligida raqamli texnologiyalarni joriy etish siyosatiga to'liq hamohangdir. Kompyuter texnologiyalari yordamida gidrotexnika inshootlari va kanallarning ish jarayonlarini haqiqiy sharoitga yaqinlashtirilgan holda imitatsiya qilish suv taqsimoti samaradorligini oshirish va yo'qotishlarni kamaytirish imkonini beradi.

Kanal-gidrotexnika tizimlari o'ziga xos murakkab obyektlar hisoblanib, ularning texnologik va texnik parametrlari ko'p qirrali tabiatga ega. Bugungi kunda irrigatsiya tizimlarida suv taqsimotining amaldagi asosiy xususiyati shundaki, suv resurslari iste'molchilarga uzluksiz oqim tarzida emas, balki ma'lum vaqt oralig'ida ochilib-yopiladigan inshootlar orqali diskret rejimda beriladi. Diskret rejimda suvning ma'lum vaqt davomida to'xtab turishi bug'lanish va sizib chiqish natijasida suv yo'qotishlarining sezilarli darajada ko'payishiga olib keladi. Shuningdek, bu jarayon suv taqsimotida vaqt kechikishlarini, iste'molchilar o'rtasida notekis taqsimotni va tashkiliy nizolarni yuzaga keltiradi.

An'anaviy gidravlik yondashuvlarda oqim dinamikasini aniq ifodalashga qaratilgan bo'lib, differensial tenglamalar, gidrograf usullari va gidromexanik modellarga asoslanadi. Ushbu modellar nazariy jihatdan chuqur asoslangan bo'lsa-da, hisoblash murakkabligi, katta hajmdagi dastlabki

ma'lumot talabi va vaqt sarfi bilan cheklanadi. Ular suv harakati deyarli sodir bo'lmaydigan "no-transit zonalar"da yetarli aniqlik bermaydi [1]. Statistik modellarda kanaldagi suv sathi, sarfi va yo'qotishlar o'rtasidagi oddiy algebraik va regressiya bog'liqliklariga asoslanadi. Afzalligi — soddalik va tezkor natija olish; kamchiligi — yangi sharoitlarga moslashuvchan emasligidir. Dinamik modellarda esa fikserlangan parametrlar butun kanalni bitta nuqtaga jamlagan holda ko'rib chiqadi va hisoblash tezligi yuqori bo'ladi, ammo faqat ma'lum sharoitlarda qo'llash mumkin. Taqsimlangan parametrlar dinamik modellar esa Sen-Venan tenglamalari asosida qurilgan bo'lib, suv harakatini makon va vaqt bo'yicha yuqori aniqlikda aks ettiradi va optimallashtirish algoritmlarida keng qo'llaniladi [2].

Xorijiy tajribada suv oqimlarini optimallashtirish asosan prognozli boshqaruv modellarini (Model Predictive Control – MPC) ishlab chiqish, optimal taqsimlash shartlarini aniqlash hamda metaevristik va ko'p mezonli optimallashtirish usullariga qaratilgan. MPC usulida model asosida kelajakdagi suv sarfi va sathi prognoz qilinib, boshqaruv signallari oldindan shakllantiriladi. Bu yondashuv ochiq kanallar va irrigatsiya tizimlarida keng qo'llanilmoqda [3].

Mahalliy tadqiqotlarda esa ko'proq daryo uchastkalari va kanallarda suvning beqaror harakatini hisoblash, differensial tenglamalarni sonli yechish usullari va gidravlik-morfometrik parametrlar aniqlash metodikalari ko'rib chiqilgan. Biroq, har ikki tajribada ham modellar asosan uzluksiz taqsimot nazariyasiga asoslangan bo'lib, amaliyotdagi diskret suv berish rejimini to'liq hisobga olmaydi [4].

Jahon amaliyotida irrigatsiya tizimlarini modellashtirish va boshqarish uchun MIKE 11, HEC-RAS va SOBEK kabi dasturiy paketlar keng qo'llaniladi. Ushbu komplekslar murakkab gidravlik jarayonlarni yuqori aniqlikda ifodalaydi, ammo yuqori narxi va maxsus mutaxassis talab qilishi asosiy kamchilik hisoblanadi. Mahalliy sharoitda yaratilgan vositalar mahalliy sug'orish tizimlariga moslashtirilgan bo'lsa-da, ular ko'pincha yagona tizimni yondashuvga ega emas va real vaqt monitoring imkoniyatlari yetarli darajada rivojlanmagan [5].

Gibrid optimal boshqaruv usullarining zarurati amaliyotda qo'llaniladigan qoida-asoslangan (rule-based) tizimlar soddalik va tezkor bo'lsa-da, o'zgaruvchan muhitda moslashuvchanlik darajasi past. Mustahkamlovchi o'rganish (RL) tizimga o'z tajribasidan o'rganish va mos qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Klassik optimallashtirish usullari (MPC, LP) bilan evristik algoritmlarni birlashtiruvchi gibrid tizimlar real vaqt prognozi va moslashuvni ta'minlab, tizim samaradorligi va barqarorligini sezilarli oshiradi. Shu bois, diskret suv taqsimoti xususiyatlarini hisobga olgan holda global optimallik va real vaqt javobini birlashtirish tadqiqotning asosiy metodologik zaruratini belgilaydi.

METODOLOGIYA

Kanal-gidrotexnika tizimlarida suv harakatini makon va vaqt bo'yicha birgalikda o'rganish uchun eng mukammal yondashuv taqsimlangan parametrlar dinamik modellar hisoblanadi. Irrigatsiya tizimlarida oqim dinamikasini va o'rnatilmagan harakatni modellashtirish asosan Sen-Venan (Saint-Venant) tenglamalari asosida quriladi. Ushbu modellar tizimi massaning saqlanishi va harakat miqdorining saqlanishi qonuniyatlariga tayanib, oqim parametrlarini yuqori aniqlikda hisoblash imkonini beradi.

Tizimning asosiy elementlari quyidagi differensial tenglamalar orqali ifodalanadi:

Oqim uzluksizligi tenglamasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

bu yerda Q – suv sarfi, A – oqim kesimining yuza maydoni, t – vaqt, va x – uzunlik koordinatasi.

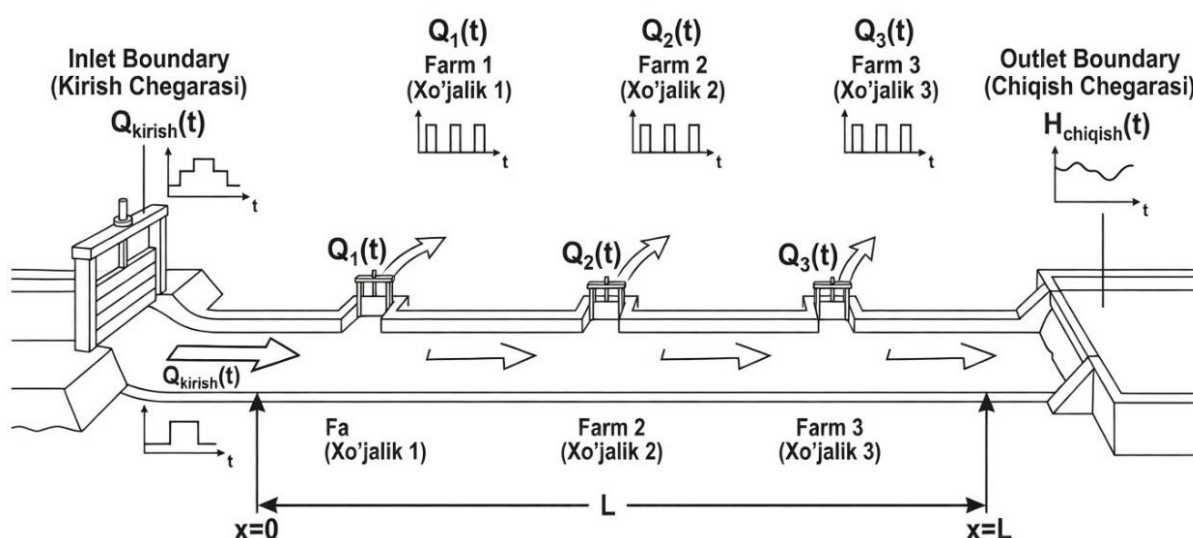
Impuls tenglamasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} + I_f - I_0 \right) = 0 \quad (2)$$

bu yerda g – erkin tushish tezlanishi, H – kanaldagi suv sathi, I_0 – kanalning geometrik qiyaligi, I_f – gidravlik qarshilik gradienti.

Suv resurslarini modellashtirishda kanal-gidrotexnika tizimlaridagi suv oqimi qat'iy chegaraviy shartlar orqali ifodalanadi. Bu shartlar matematik modelning aniqligini va optimallashtirish masalasi yechimlarining real sharoitga to'liq mos kelishini ta'minlaydi.

Quyidagi rasmda kanalning umumiy uzunligi bo'yicha kirish qismidagi suv sarfi, chiqishdagi suv sathi hamda magistral kanal bo'yida joylashgan xo'jaliklarning suv olish nuqtalari aniq ko'rsatilgan. Sxema irrigatsiya tizimida suvning diskret ravishda taqsimlanishini va chegaraviy shartlarning matematik model doirasidagi muhim rolini yaqqol tasvirlab beradi.



1-rasm. Kanal bo'yicha kirish va chiqish chegaraviy shartlari hamda iste'molchilar suv olish nuqtalari.

Kanal-gidrotexnika tizimlarida suv resurslarini boshqarish samaradorligini ta'minlash uchun qabul qilinadigan qarorlar texnik, iqtisodiy va ekologik sifat mezonlarini birgalikda qamrab olishi zarur. Shuning uchun suv resurslarini boshqarishda ko'p mezonli optimallashtirish yondashuvi qo'llaniladi. Optimallashtirish masalasi matematik jihatdan maqsad funksiyasi va unga bog'liq bo'lgan cheklovlar tizimi orqali ifodalanadi.

Suv taqsimoti jarayonini boshqarish va uning optimal parametrlarini hisoblash quyidagi matematik bosqichlar asosida amalga oshiriladi:

1-qadam: Tizimning dinamik modelini matritsa ko'rinishida shakllantirish Sen-Venan differensial tenglamalari asosida suv oqimining uzluksiz o'rnatilmagan harakati raqamli boshqaruvga moslashtirish uchun diskret vaqtdagi holatlar fazosi modeliga o'tkaziladi. Tizim quyidagi chiziqli dinamik tenglama bilan ifodalanadi:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + d(k) \quad (3)$$

bu yerda $x(k)$ – k -vaqt qadamidagi tizim holati vektori (kanaldagi suv sathlari va sarflari), $u(k)$ – boshqaruv ta'siri vektori (gidrotexnika inshootlari va zolotniklarning ochilish darajasi yoki suv berish hajmlari), $d(k)$ – nazorat qilib bo'lmaydigan tashqi ta'sirlar va tizimdagi suv yo'qotishlari.

A va B – tizim dinamikasi va boshqaruv ta'sirini belgilovchi o'tish matritsalar.

2-qadam: Fizik va texnik cheklovlarni kiritish

Optimallashtirish masalasi real hayot qonuniyatlariga zid kelmasligi uchun suv sathi va sarfi bo'yicha qat'iy cheklovlar tengsizliklar tizimi orqali kiritiladi:

$$\begin{aligned}x_{min} &\leq x(k) \leq x_{max} \\u_{min} &\leq u(k) \leq u_{max} \\\Delta u_{min} &\leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{max}\end{aligned}$$

bu yerda x_{min}, x_{max} kanaldagi suv sathining ruxsat etilgan xavfsiz chegaralarini, $\Delta u(k)$ esa inshootlarning ochilish-yopilish tezligi cheklovlarini bildiradi.

3-qadam: MPC uchun kvadratik maqsad funksiyasini tuzish

MPC algoritmining asosiy vazifasi kelajakdagi N ta qadam uchun quyidagi maqsad funksiyasini J minimallashtirishdan iborat:

$$J = \sum_{i=1}^N \left(\|x(k+i|k) - x_{ref}(k+i)\|_Q^2 + \|\Delta u(k+i-1|k)\|_R^2 \right) \quad (4)$$

bu yerda: x_{ref} – iste'molchilarning talabiga ko'ra o'rnatilgan ideal (mo'ljallangan) suv sathi yoki hajmi, Q – suv taqsimotidagi xatolik (defitsit yoki profitsit) uchun jarima matritsasi, R – boshqaruv resurslari sarfi va inshootlar eskirishini kamaytirish uchun jarima matritsasi.

4-qadam: MPC yordamida lokal optimallashtirish masalasini yechish

Tizim $J \rightarrow \min$ shartini qanoatlantiruvchi boshqaruv signallari ketma-ketligini hisoblab chiqadi. Masala kvadratik dasturlash usullari yordamida yechiladi va optimal boshqaruv vektori topiladi:

$$U^* = [u^*(k), u^*(k+1), \dots, u^*(k+N-1)] \quad (5)$$

5-qadam: RL algoritmi yordamida noaniqliklarni kompensatsiya qilish

Tizimdagi kutilmagan suv yo'qotishlari va diskret rejimdagi o'zgarishlarga tezkor moslashish uchun Mustahkamlovchi o'rganish (RL) agenti ishga tushadi. RL agenti optimal siyosatni π^* topish uchun kutilayotgan umumiy mukofotni R_t maksimallashtiradi:

$$V^\pi(s) = \mathbb{E}_\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_t \mid s_0 = s \right] \quad (6)$$

RL algoritmi (masalan, Q-learning yoki DDPG) MPC tizimidan chiqayotgan tayanch qarorga kutilmagan muhit xatolarini to'g'irlovchi $\Delta u_{RL}(k)$ ta'sirini qo'shadi. Yakuniy gibril boshqaruv signali quyidagicha shakllanadi:

$$u_{gibrid}(k) = u_{MPC}^*(k) + \Delta u_{RL}(k) \quad (7)$$

6-qadam: Sirpanuvchi ufq (Receding Horizon) tamoyili va uzluksiz iteratsiya

Hisoblangan U^* ketma-ketlikning faqatgina birinchi elementi $u_{gibrid}(k)$ real vaqtda gidrotexnika tizimiga qo'llaniladi. So'ngra sensorlar orqali $x(k+1)$ yangi holat o'lchanadi va $k = k+1$ qadam uchun butun optimallashtirish jarayoni soniyalar ichida yangidan iteratsiya qilinadi.

Suv taqsimoti jarayonlari o'zgaruvchanlik, vaqt kechikishlari va noaniqliklarga ega bo'lgan murakkab tizimdir. Shu sababli, amaliy boshqaruv tizimida alohida algoritmlarning integratsiyalashgan, moslashuvchan shaklda ishlatilishi eng samarali yondashuv hisoblanadi. Gibril yondashuvlarda klassik optimallashtirish usullari (LP, MPC) evristik algoritmlar bilan birlashtiriladi.

NATIJA

Ishlab chiqilgan gibrid optimal boshqaruv modelining samaradorligini amaliy holatlarda tekshirish maqsadida irrigatsiya kanallari bo'yicha turli kirish suv hajmlari, iste'molchilar talabi va yo'qotishlar darajasini hisobga olgan holda uch xil stsenariy asosida tajriba sinovlari o'tkazildi. 1-stsenariy: Kanalga kelayotgan suv hajmi xo'jaliklarning umumiy talabidan yuqori bo'lgan holat. Ushbu sharoitda algoritim barcha iste'molchilar talabini to'liq qondirdi va ortiqcha hisoblashsiz barqaror ishladi. 2-stsenariy: Kanalga kelayotgan suv hajmi umumiy talabdan past bo'lgan holat. Bu sharoitda gibrid model o'zining ustuvorlik (prioritet) mexanizmini ishga tushirdi: eng muhim xo'jaliklarning kafolatli talabi qondirilib, qolgan suv ikkinchi darajali iste'molchilarga adolatli proporsional tarzda taqsimlandi. 3-stsenariy: Yo'qotishlar koeffitsiyenti oshishi hisobiga kanalning samarali suv hajmi keskin kamaygan holat. Algoritim yo'qotishlarni minimallashtirish va mavjud resursdan maksimal foydalanish choralarini ko'rib, talablarni qisman, ammo eng maqbul shaklda qondirdi.

1-jadval.

Turli stsenariylar bo'yicha talab, kirish, samarali va ajratilgan suv miqdorlari natijalari

Stsenariy turlari	Jami talab (m ³ /s)	Kirish hajmi (m ³ /s)	Samarali hajm (m ³ /s)	Ajratilgan hajm (m ³ /s)
1-stsenariy (Suv yetarli)	3.00	3.50	3.32	3.00
2-stsenariy (Suv tanqis)	5.20	4.50	4.50	4.50
3-stsenariy (Yo'qotish yuqori)	3.80	3.00	2.64	2.64

Dasturiy vosita va gibrid algoritim yordamida suv taqsimoti jarayoni avvalgi an'anaviy usullarga nisbatan keskin tezlashdi. Oddiy sharoitda 20–30 daqiqa davom etadigan hisoblash va qaror qabul qilish jarayoni dasturiy kompleks orqali bir necha soniyada bajarildi. Bu esa boshqaruvdagi kechikishlarni bartaraf etdi. Eng muhimi, modelning real vaqt rejimida moslashuvchan ishlashi hamda suv tanqisligi sharoitida ham resurslardan oqilona foydalanishni ta'minlashi natijasida irrigatsiya tizimlarida umumiy samaradorlikni 15–20% ga oshirishga erishildi.

XULOSA

Tadqiqot doirasida kanal-gidrotexnika tizimlarida suv resurslarini samarali boshqarish uchun Sen-Venan tenglamalariga asoslangan o'rnatilmagan harakat modeli va zamonaviy intellektual algoritmlarni birlashtirgan gibrid optimal boshqaruv modeli ishlab chiqildi. Natijalar shuni tasdiqlaydiki, taklif etilgan gibrid model nazariy va amaliy jihatdan ishonchli yechim bo'lib, o'zgaruvchan sharoitlarda, ayniqsa suv tanqisligi va yuqori yo'qotishlar davrida tizim barqarorligini to'liq ta'minlaydi.

Ushbu modellarning dasturiy ta'minot shaklida realizatsiya qilinishi murakkab gidravlik jarayonlarni tezkor hisoblash imkonini berdi. Avtomatlashtirilgan dasturiy tizim inson omilidan kelib chiqadigan xatoliklarni keskin qisqartirdi va qaror qabul qiluvchi mutaxassislarga turli stsenariylarni oldindan sinab orqali ilmiy asoslangan, tezkor qarorlar qabul qilish imkoniyatini yaratdi. Kelajakda ushbu tizimga sun'iy intellekt va mashinaviy o'rganish elementlarini chuqurroq integratsiya qilish orqali irrigatsiya tizimlarini to'liq avtonom va "aqli" boshqaruv rejimiga o'tkazish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Reddy, J.M. Decentralized constant-volume control of irrigation canals. Mountain Scholar. 1990 <https://mountainscholar.org/bitstreams/2c21e4d8-ec5e-4481-a0ec-e891bd609586/download>
2. D Nagesh Kumar and others. Extended Muskingum method for flood routing. Journal of Hydro-environment Research 5(2), 2021.127-135 p.

3. Negenborn, R.R. et al. Distributed model predictive control of irrigation canals. Networks and Heterogeneous Media. 2009 <https://www.aimspress.com/article/id/70f009e7-7f0b-45fa-b67a-5624faab76bc>
4. Bekchanov, M. et al. Optimizing irrigation efficiency improvements in the Aral Sea Basin. Environmental Science & Policy. 2016 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212428415300050>
5. Fele, F. et al. (2025). Coalitional model predictive control of an irrigation canal. arXiv: 2501.17561. <https://arxiv.org/pdf/2501.17561>
6. Patel, H. et al. (2023). Hybrid Reinforcement Learning for Optimizing Pump Sustainability in Real-World Water Distribution Networks. arXiv: 2310.09412. <https://arxiv.org/abs/2310.09412>

[DOI 10.5281/zenodo.20225473](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225473)

O'ZBEKISTONDA BANK-MOLIYA TIZIMINING IQTISODIY RIVOJLANISHDA VA KICHIK BIZNESNI QO'LLAB-QUVVATLASHDAGI O'RNI

Temirov Ahmadjon Javli o'g'li

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti 4-bosqich talabasi

t.f.d., prof. A.J.Seytov

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti professori

Annotatsiya: Mazkur maqolada O'zbekistonda bank-moliya tizimi va uning kichik hamda o'rta biznesni rivojlantirishdagi o'rni yoritilgan bo'lib, uning nazariy va amaliy jihatlari qisqacha tahlil qilingan. Maqolada, shuningdek, banklar tomonidan tadbirkorlik subyektlarini moliyaviy qo'llab-quvvatlash mexanizmlari, kreditlash, investitsiyalarni moliyalashtirish, soliq va byudjet siyosati bilan o'zaro bog'liqligi o'z aksini topgan. Bundan tashqari, maqolada moliyaviy munosabatlarning mohiyati, bank tizimining mikro va makro darajadagi ahamiyati, sug'urta va risklarni boshqarish mexanizmlari, soliqlar va ularning vazifalari, davlat byudjeti hamda moliyaviy siyosatning iqtisodiy rivojlanish va ijtimoiy sohalariga ta'siri kabi muhim masalalar keng yoritilgan.

Kalit so'zlar: bank tizimi, kichik va o'rta biznes, moliyaviy siyosat, kreditlash, investitsiyalar, sug'urta, soliqlar, davlat byudjeti.

KIRISH

Keyingi yillarda O'zbekiston Respublikasi hukumati bozor munosabatlariga asoslangan iqtisodiyotni shakllantirishga qaratilgan izchil iqtisodiy islohotlarni amalga oshirmoqda. Ushbu islohotlar strategiyasi davlat iqtisodiy siyosatining muhim yo'nalishlarini qamrab olib, ayniqsa bank-moliya tizimini rivojlantirish hamda kichik va o'rta biznesni qo'llab-quvvatlashga alohida e'tibor qaratmoqda. Bozor iqtisodiyoti sharoitida bank tizimi iqtisodiyotni moliyaviy tartibga solish, tadbirkorlik subyektlarini qo'llab-quvvatlash va moliyaviy barqarorlikni ta'minlashda muhim o'rin tutadi. Shu bois, mamlakatda banklarning kichik va o'rta biznesni rivojlantirishdagi roli tobora ortib bormoqda. Ushbu maqolada bank tizimi va uning kichik hamda o'rta biznesni qo'llab-quvvatlashdagi ahamiyati izchil o'rganilib, turli yo'nalishlarda uning iqtisodiy jarayonlarga ta'siri yoritiladi.

Bank-moliya tizimi iqtisodiyot doirasida o'zaro bog'liq bo'lgan bir qator muhim vazifalarni bajaradi:

Ta'minlash: kichik va o'rta biznes subyektlarini kredit, investitsiya va boshqa moliyaviy resurslar bilan ta'minlash orqali iqtisodiy loyihalarni amalga oshirishga xizmat qiladi.

Taqsimlash: moliyaviy resurslarni hududlar va tarmoqlar kesimida samarali taqsimlash orqali iqtisodiy muvozanatni ta'minlaydi.

Rag'batlantirish: kreditlash, imtiyozli moliyalashtirish va investitsiya mexanizmlari orqali tadbirkorlik faoliyatini rivojlantirishni qo'llab-quvvatlaydi.

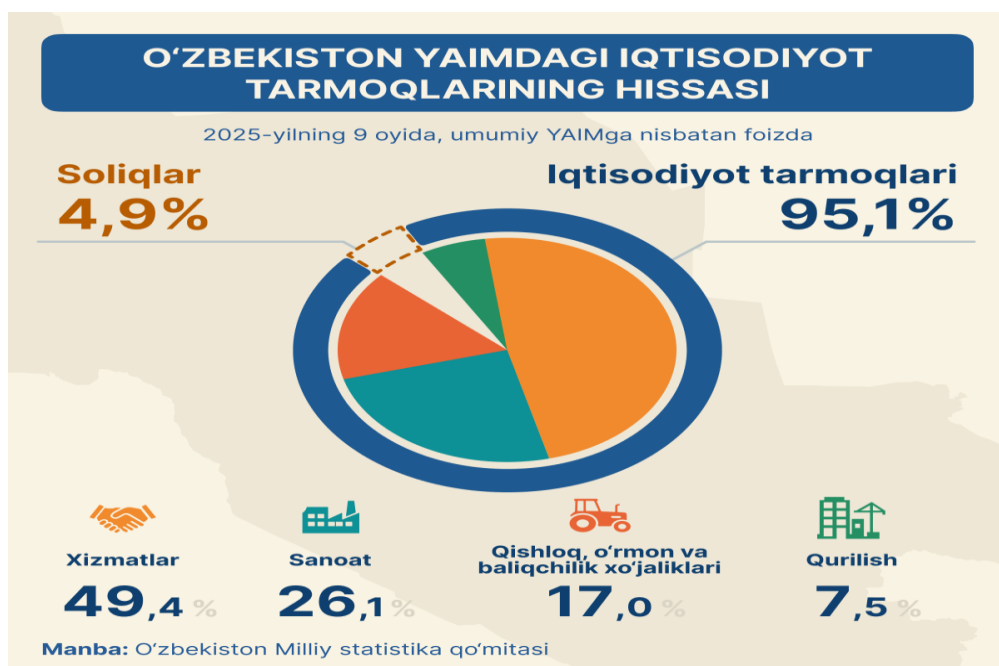
Nazorat qilish: moliyaviy resurslardan foydalanish ustidan monitoring olib borish orqali ularning maqsadli sarflanishini ta'minlaydi.

Iqtisodiy jarayonlarning jadal sur'atlarda rivojlanishi va ijtimoiy takror ishlab chiqarishning samarali amalga oshirilishi ko'p jihatdan bank-moliya tizimiga bog'liqdir. Takror ishlab chiqarish jarayonlarining barcha bosqichlarida moliyaviy resurslar muhim vosita sifatida qatnashib, iqtisodiy o'sish va barqarorlikni ta'minlashga xizmat qiladi[1].

Tahlil va Natijalar

Bank-moliya tizimi iqtisodiyotning asosiy ustunlaridan biri hisoblanadi, chunki uning vositasida maqsadli yo'naltirilgan pul mablag'lari fondlari shakllantiriladi hamda ular iqtisodiy rivojlanish va jamiyat ehtiyojlarini qondirish yo'lida taqsimlanadi. Ushbu tizim orqali iqtisodiyotda pul oqimlarining uzluksizligi ta'minlanadi, moliyaviy resurslar samarali yo'naltiriladi va iqtisodiy subyektlar o'rtasidagi o'zaro hisob-kitoblar tartibga solinadi. Avvalo, "moliya" tushunchasining mazmuniga to'xtaladigan bo'lsak, u arabcha kelib chiqishga ega bo'lib, pul mablag'lari, boylik va mol-mulk bilan bog'liq iqtisodiy munosabatlarni anglatadi. Mazkur atama fransuzcha *finance*, lotincha *financia* hamda ruscha *finansi* so'zlari bilan mazmunan yaqin bo'lib, daromad, pul oqimlari va to'lovlar bilan bog'liq jarayonlarni ifodalaydi. Moliya davlatning shakllanishi va uning resurslarga bo'lgan ehtiyojining ortishi bilan uzluksiz tovar-pul munosabatlari sharoitida rivojlanib borgan[2]. Shu jihatdan moliya mamlakatning iqtisodiy mustaqilligini mustahkamlash, ichki resurslarni safarbar etish, investitsion faollikni rag'batlantirish va ijtimoiy barqarorlikni ta'minlashda muhim vosita hisoblanadi. Bundan tashqari, moliya orqali davlat iqtisodiyotning ustuvor yo'nalishlarini belgilash, resurslarni strategik sohalarga yo'naltirish hamda iqtisodiy siyosatni samarali amalga oshirish imkoniyatiga ega bo'ladi. Ayniqsa, sanoat, infratuzilma, energetika, transport va ijtimoiy sohalarga yo'naltirilgan moliyaviy resurslar iqtisodiy rivojlanishning barqarorligini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. Shu bilan birga, moliya tizimi davlat tomonidan olib borilayotgan fiskal siyosatni samarali amalga oshirish, byudjet daromadlarini barqaror oshirish va davlat xarajatlarini maqbullashtirish imkonini beradi. Davlat byudjeti orqali moliyalashtiriladigan dasturlar ijtimoiy himoya tizimini mustahkamlash, aholi bandligini oshirish va iqtisodiy tenglikni ta'minlashga xizmat qiladi. Shuningdek, bank-moliya tizimi iqtisodiyotni tartibga solishning muhim vositasi sifatida monetar siyosatni amalga oshirishda ham muhim o'rin tutadi.

1-rasm



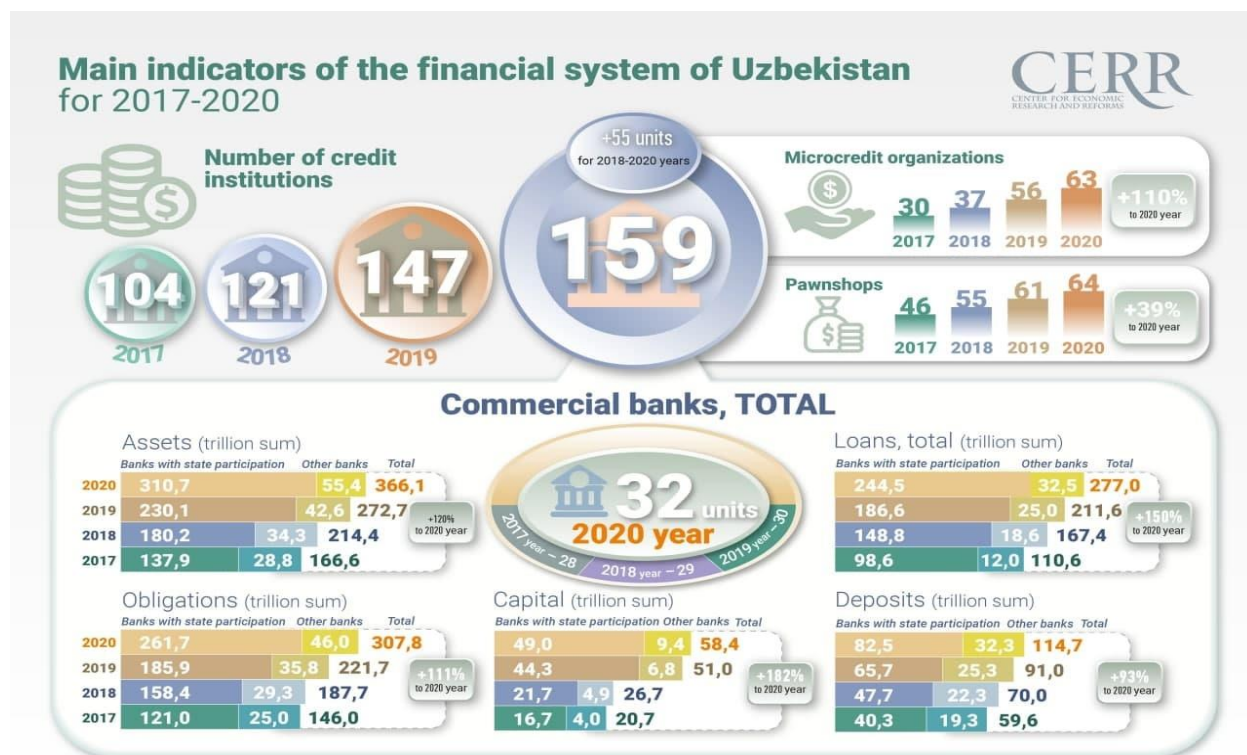
Mazkur ko'rsatkichlar O'zbekiston iqtisodiyotida xizmatlar sohasi yetakchilik qilayotganini, sanoat va qishloq xo'jaligi esa asosiy tayanch tarmoqlar sifatida faoliyat yuritayotganini ko'rsatadi. Bu esa iqtisodiyotning diversifikatsiyalashgan va barqaror rivojlanayotganidan dalolat beradi.

⁹<https://stat.uz/>

Markaziy bank tomonidan foiz stavkalari, majburiy zaxira me'yorlari va ochiq bozor operatsiyalari orqali pul massasi nazorat qilinadi hamda inflyatsiya darajasi barqaror ushlab turiladi. Bu esa iqtisodiy barqarorlikni ta'minlash bilan birga investitsion muhitni yaxshilashga xizmat qiladi. Shu bilan birga, bank tizimi orqali iqtisodiyotga yo'naltirilgan kreditlar ishlab chiqarish hajmini oshirish, kichik va o'rta biznesni rivojlantirish hamda yangi ish o'rinlarini yaratishda muhim omil bo'lib xizmat qiladi. Zamonaviy sharoitda bank-moliya tizimining ahamiyati raqamli texnologiyalar rivoji bilan yanada ortib bormoqda. Elektron to'lov tizimlari, mobil banking xizmatlari, masofaviy bank operatsiyalari va fintech innovatsiyalari moliyaviy xizmatlarning tezligi va qulayligini oshirmoqda. Bu esa aholining moliyaviy xizmatlardan foydalanish darajasini kengaytirib, iqtisodiy faollikni oshirishga xizmat qiladi. Shu jihatdan moliya tizimi nafaqat iqtisodiy o'sishni ta'minlash, balki jamiyatda moliyaviy savodxonlikni oshirish va moliyaviy madaniyatni shakllantirishda ham muhim o'rin tutadi.

Moliya iqtisodiy kategoriya sifatida pul mablag'laridan foydalanish va ularning harakatini tartibga solish bilan bog'liq munosabatlar tizimi sifatida qaraladi. Uning yordamida turli darajadagi pul fondlari shakllantirilib, ular takror ishlab chiqarish ehtiyojlari hamda ijtimoiy sohalarini moliyalashtirishga yo'naltiriladi. Moliya pul bilan bog'liq munosabat bo'lsa-da, u pulning o'zi emas, balki markazlashgan va markazlashmagan pul fondlarini shakllantirish, taqsimlash va qayta taqsimlash jarayonida yuzaga keladigan iqtisodiy munosabatlarni ifodalaydi. Shu bilan birga, moliya tizimi iqtisodiyotning barcha tarmoqlarini o'zaro bog'lab, ishlab chiqarish, taqsimlash, ayirboshlash va iste'mol bosqichlarining uzviyligini ta'minlaydi. Natijada iqtisodiy resurslarning samarali harakati va iqtisodiy o'sishning barqarorligi ta'minlanadi. Bundan tashqari, moliya tizimi orqali davlat iqtisodiy inqirozlarni yumshatish, moliyaviy barqarorlikni saqlash va uzoq muddatli rivojlanishni ta'minlash imkoniga ega bo'ladi. Shu jihatdan moliya tizimi makroiqtisodiy barqarorlikni ta'minlashda asosiy vositalardan biri hisoblanadi.

2-rasm



Moliya daromadlar asosida shakllanib, ularning taqsimlanishi orqali korxonalar, davlat va xonadonlar moliyasi yuzaga keladi. Birlamchi taqsimot jarayonida korxonalar moliyaviy fondlar hosil qiladi, xodimlar ish haqi oladi va xonadon daromadlari shakllanadi, korxonalar esa byudjetga soliqlar to'lab davlat daromadlarini ta'minlaydi. Ikkilamchi taqsimotda esa byudjetdan transferlar, subsidiyalar va maxsus fondlar orqali qayta taqsimlash amalga oshiriladi. Ushbu jarayonlar ijtimoiy tenglikni ta'minlash, hududlar o'rtasidagi iqtisodiy tafovutlarni kamaytirish va aholi farovonligini oshirishga xizmat qiladi. Bundan tashqari, qayta taqsimlash mexanizmlari orqali ustuvor sohalarni moliyalashtirish va iqtisodiy muvozanatni saqlashga erishiladi. Shu bilan birga, bu jarayon iqtisodiy barqarorlikni mustahkamlash va daromadlar o'rtasidagi tafovutni kamaytirishga xizmat qiladi.

Mazkur ko'rsatkichlar O'zbekistonda bank-moliya tizimi qisqa vaqt ichida sezilarli rivojlanganini, moliyaviy resurslar hajmi oshganini hamda kichik biznesni qo'llab-quvvatlash mexanizmlari kengayganini ko'rsatadi. Bu esa iqtisodiy o'sish, investitsiya faolligi va bandlik darajasining oshishiga ijobiy ta'sir ko'rsatmoqda

Moliyaviy tizim jismoniy shaxslar, davlat va korxonalar o'rtasida sodir bo'ladigan kapital oqimlarini o'z ichiga oladi. Uning asosiy komponentlari moliyaviy bozorlar, moliyaviy aktivlar, moliya institutlari va moliyaviy xizmatlardan iborat. Moliyaviy bozorlar aksiyalar, obligatsiyalar, valyutalar va boshqa vositalar bilan savdo qilish imkonini beradi. Moliyaviy aktivlarga esa naqd pul, depozitlar, qimmatli qog'ozlar va investitsiya fondlari kiradi. Moliya institutlari investorlar va qarz oluvchilar o'rtasida vositachi vazifasini bajarib, jamg'armalarni iqtisodiyotga yo'naltiradi[2]. Shu orqali investitsion faollik kuchayib, ishlab chiqarish kengayadi, yangi ish o'rinlari yaratiladi va iqtisodiy o'sish jadallashadi. Bundan tashqari, moliyaviy vositachilik tizimi kapitalning samarali harakatini ta'minlab, iqtisodiy samaradorlikni oshiradi.

Kompaniya nuqtai nazaridan qaralganda, moliya tizimi buxgalteriya hisobi, daromad va xarajatlarni boshqarish, ish haqi hamda kredit operatsiyalarini qamrab oluvchi protseduralarni o'z ichiga oladi. Zamonaviy sharoitda pul, kredit va moliyaviy instrumentlar ayirboshlash vositalari sifatida keng qo'llanilib, iqtisodiy jarayonlarni tezlashtiradi. Raqamli texnologiyalar, elektron to'lov tizimlari, mobil bank xizmatlari va fintech innovatsiyalarining joriy etilishi moliyaviy operatsiyalarni tez, shaffof va samarali amalga oshirish imkonini bermoqda. Bu esa moliyaviy tizimning raqobatbardoshligini oshirishga xizmat qiladi. Shu bilan birga, raqamli transformatsiya moliyaviy xizmatlardan foydalanish imkoniyatini kengaytirib, iqtisodiy faoliyatni yanada jadallashtirmoqda.

Moliyaviy tizim keng ma'noda davlat moliyasi, mahalliy moliya va xo'jalik yurituvchi subyektlar moliyasiga bo'linadi. Davlat moliyasi tarkibiga davlat byudjeti, byudjetdan tashqari fondlar va davlat krediti kirsa, xo'jalik subyektlari moliyasiga tijorat korxonalari, moliyaviy vositachilar va notijorat tashkilotlar moliyasi kiradi. Ushbu bo'linish YaIMni shakllantirish va qayta taqsimlash jarayonida turli subyektlarning ishtirok etishi bilan belgilanadi[3]. Shu jihatdan moliyaviy tizim iqtisodiyotda resurslarni samarali taqsimlash, moliyaviy intizomni mustahkamlash va barqaror rivojlanishni ta'minlashda muhim rol o'ynaydi.

Moliyaviy siyosat moliyaviy resurslarni shakllantirish, taqsimlash va ulardan foydalanish usullarini belgilovchi chora-tadbirlar majmui hisoblanadi. Uning asosiy yo'nalishi resurslar hajmini oshirish va ularning uzluksizligini ta'minlashdir. Moliyaviy siyosat davlatning iqtisodiy va ijtimoiy dasturlarini amalga oshirish uchun zarur resurslarni safarbar etishga xizmat qiladi[4]. Shu bilan birga, moliyaviy siyosat inflyatsiyani nazorat qilish, investitsion muhitni yaxshilash, bandlikni oshirish va iqtisodiy barqarorlikni ta'minlashda muhim vosita hisoblanadi.

Xalqaro moliya xalqaro darajadagi moliyaviy oqimlar va ularning harakatini ifodalaydi. U jahon iqtisodiy makonida mamlakatlar o'rtasida doimiy ravishda harakatlanib turadigan pul oqimlarining

murakkab va uyg'un tizimini namoyon etadi. Ushbu jarayon go'yoki global iqtisodiyot tomirlarida oqib yuruvchi qon singari harakat qilib, davlatlar o'rtasidagi iqtisodiy aloqalarning uzviyligini ta'minlaydi. U xalqaro valuta, kredit, investitsiya va savdo munosabatlarini qamrab olib, mamlakatlar o'rtasidagi pul oqimlarini tartibga soladi. Shu orqali jahon xo'jaligi subyektlari o'rtasida iqtisodiy muvozanatni saqlashga xizmat qiladi. Xalqaro moliya tizimining asosiy ishtirokchilari banklar, transmilliy korporatsiyalar, investorlar va xalqaro tashkilotlardir. Ular global moliyaviy makonda o'zaro chambarchas bog'langan holda faoliyat yuritib, iqtisodiy jarayonlarning barqaror rivojlanishiga xizmat qiladi. Ularning faoliyati milliy moliya tizimiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi[5]. Ayniqsa, xalqaro kapital oqimlari milliy iqtisodiyotlar uchun yangi imkoniyatlar eshigini ochib beradi, innovatsion texnologiyalarni joriy etish va ishlab chiqarish samaradorligini oshirishga yordam beradi.

3-rasm



Mazkur ko'rsatkichlar Surxondaryo viloyatida kichik biznes va xususiy tadbirkorlikning rivojlanib borayotganini, ammo ayrim davrlarda beqarorlik ham mavjudligini ko'rsatadi. Shu bois, bank-moliya tizimi orqali kichik biznesni qo'llab-quvvatlash, kreditlashni kengaytirish va eksportni rag'batlantirish muhim ahamiyat kasb etadi.

Global integratsiya sharoitida xalqaro moliyaviy oqimlar milliy iqtisodiyotning raqobatbardoshligini oshirish, eksport salohiyatini kengaytirish va investitsiyalarni jalb qilishda muhim rol o'ynaydi. Shu bilan birga, xalqaro moliya davlatlar o'rtasida iqtisodiy hamkorlikni mustahkamlab, o'zaro manfaatli aloqalarni kengaytiradi hamda iqtisodiy taraqqiyotning yangi

¹⁰ <https://stat.uz/>

ufqlarini ochadi. Bugungi globalashuv davrida xalqaro moliya nafaqat iqtisodiy jarayonlarni tartibga soluvchi vosita, balki mamlakatlar o'rtasidagi o'zaro ishonch va hamkorlikni mustahkamlovchi muhim omil sifatida namoyon bo'lmoqda.

Sug'urta esa moliya tizimining muhim bo'g'ini bo'lib, tabiiy ofatlar, baxtsiz hodisalar va boshqa risklar natijasida yuzaga keladigan zararlarni qoplashga xizmat qiladi. Sug'urta munosabatlari sug'urta mukofotlari hisobidan shakllangan pul fondlari orqali amalga oshiriladi. Ushbu fondlar sug'urta hodisasi yuz bergan taqdirda zarar ko'rgan jismoniy yoki yuridik shaxslarga moliyaviy kompensatsiya to'lash uchun ishlatiladi. Shu jihatdan sug'urta iqtisodiy barqarorlikni ta'minlovchi muhim mexanizm sifatida namoyon bo'ladi. Rivojlangan mamlakatlarda sug'urta badallari YAIMning 8–12 foizini tashkil etadi va iqtisodiy barqarorlikni ta'minlashda muhim o'rin tutadi[6]. Sug'urta tizimi ishlab chiqarish jarayonining uzluksizligini ta'minlash, investitsiya muhitini yaxshilash hamda moliyaviy xavflarni kamaytirish orqali iqtisodiy o'sishni rag'batlantiradi. Ayniqsa, yirik sanoat korxonalari va infratuzilma loyihalarida sug'urta risklarni kamaytirish orqali investorlar ishonchini oshiradi va uzoq muddatli investitsiyalarni jalb etishga yordam beradi. Bundan tashqari, sug'urta tizimi investitsion jarayonlarning barqarorligini ta'minlash, moliyaviy xavflarni kamaytirish va iqtisodiy barqarorlikni mustahkamlashda muhim vosita hisoblanadi. Sug'urta kompaniyalari tomonidan yig'ilgan mablag'lar ko'pincha qimmatli qog'ozlar, davlat obligatsiyalari va boshqa moliyaviy instrumentlarga investitsiya qilinadi, bu esa moliya bozorlarining rivojlanishiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Shu bilan birga, sug'urta tizimi aholi farovonligini oshirishda ham muhim rol o'ynaydi, chunki u sog'liqni saqlash, pensiya ta'minoti va mulkni himoya qilish orqali fuqarolarning moliyaviy xavfsizligini ta'minlaydi. Shuningdek, zamonaviy sharoitda sug'urta xizmatlari turlari kengayib bormoqda. Hayot sug'urtasi, sog'liq sug'urtasi, transport sug'urtasi, mol-mulk sug'urtasi, javobgarlik sug'urtasi va qishloq xo'jaligi sug'urtasi kabi yo'nalishlar iqtisodiyotning turli sohalarini moliyaviy himoya bilan ta'minlamoqda. Bu esa iqtisodiy subyektlarning faoliyatini barqaror yuritish, kutilmagan yo'qotishlarning oldini olish va iqtisodiy tizimning umumiy barqarorligini mustahkamlashga xizmat qiladi.

Xulosa qilib aytganda, O'zbekistonda bank-moliya tizimi mamlakat iqtisodiy rivojlanishining institutsional tayanchi sifatida namoyon bo'lib, makroiqtisodiy barqarorlikni ta'minlash, real sektorni moliyalashtirish hamda kichik biznesni qo'llab-quvvatlashda hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi. Banklar tomonidan kreditlash, investitsion vositalar, hisob-kitob xizmatlari va moliyaviy maslahatlar orqali ishlab chiqarish jarayonlari jadallashadi, yangi ish o'rinlari yaratiladi va tadbirkorlik faolligi ortadi. Ayniqsa, kichik va o'rta biznes subyektlariga yo'naltirilgan imtiyozli kreditlar, subsidiyalar, kafillik mexanizmlari hamda soliq yengilliklari iqtisodiyotda diversifikatsiyani kuchaytirib, ichki bozor barqarorligini mustahkamlashga xizmat qiladi. Ilmiy nuqtai nazardan qaraganda, bank-moliya tizimi resurslarni samarali taqsimlash, kapital harakatini tezlashtirish va iqtisodiy muvozanatni saqlash orqali iqtisodiy o'sishning multiplikativ ta'sirini yuzaga keltiradi. Kredit resurslarining real sektor, ayniqsa kichik biznesga yo'naltirilishi ishlab chiqarish hajmining oshishi, texnologik yangilanish va innovatsion faoliyatning kengayishiga olib keladi. Shu bilan birga, moliyaviy vositachilik darajasining oshishi kapital bozorlarini rivojlantirib, milliy iqtisodiyotning raqobatbardoshligini mustahkamlaydi. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, bank-moliya tizimi orqali amalga oshirilayotgan moliyalashtirish mexanizmlari iqtisodiyotda barqarorlikni ta'minlash bilan birga, hududlar o'rtasidagi iqtisodiy tafovutlarni kamaytirish va ijtimoiy farovonlikni oshirishga xizmat qiladi. Ayniqsa, hududiy banklar va mikromoliyaviy institutlarning rivojlanishi kichik biznes subyektlarining moliyaviy resurslarga kirishini kengaytirib, ularning iqtisodiy mustaqilligini mustahkamlaydi.

Kelgusida bank-moliya tizimini yanada rivojlantirish uchun raqamli moliya texnologiyalarini keng joriy etish, risklarni boshqarish tizimini takomillashtirish, moliyaviy inklyuziyani oshirish hamda kichik biznesni qo'llab-quvvatlashning innovatsion mexanizmlarini kengaytirish zarur. Shu jihatdan

bank-moliya tizimini modernizatsiya qilish mamlakatning uzoq muddatli iqtisodiy o'sishi, ijtimoiy barqarorligi va global iqtisodiyotdagi raqobatbardoshligini ta'minlashning muhim omili hisoblanadi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

- 1.To'rayevich, I. A. (2025). Attracting Investments into the National Economy and their Management: Current Status. *Miasto Przyszłości*, 56, 315-322. T.S. Malikov,
- 2.O. Olimjonov. Moliya - O 'quv qo 'llanma. T.: "Iqtisod-moliya, 2012
- 3.T. Malikov, N. Haydarov. Davlat byudjeti - T.: "Iqtisod-moliya, 2007
- 4.A.Ваҳобов, Т.Маликов. Молия: дарслик. - Т.: Ношир, 2011
- 5.T.Malikov, N.Haydarov - Budjet daromadlari va xarajatlari. O 'quv qo 'llanma, Toshkent: "IQTISOD-MOLIYA, 2007
- 6.T.C.Маликов, П.Т.Жалилов. Бюджет-солиқ сиёсати.Тошкент: 2023y

[DOI 10.5281/zenodo.20225456](https://doi.org/10.5281/zenodo.20225456)

SUV VA SEL-SUV OMBORLARINING SUV SATHINI NAZORAT QILISHNI AVTOMATLASHTIRISH

Dilshodbek Turobov - "TIQXMMI" MTU "GTINSF" ta'lim yo'nalishi 201-guruh talabasi.
Safar Mansurov - "TIQXMMI" MTU "Gidrologiya va gidrogeologiya" kafedrasida dotsenti.

Annotatsiya: Ushbu maqolada gidrotexnika inshootlari, xususan kanal va zovurlarda suv sathini masofadan nazorat qilish va boshqarish imkonini beruvchi avtomatlashtirilgan tizim loyihasi ko'rib chiqilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi BC547 tranzistorlari va arzon elektron komponentlar asosida suv sathi ma'lum darajaga yetganda xabar beruvchi hamda jarayonni vizual monitoring qiluvchi qurilma yaratishdir. Taklif etilayotgan texnik yechim suv resurslaridan oqilona foydalanish, toshqinlarning oldini olish va irrigatsiya tizimlarini raqamlashtirishda yuqori samaradorlikka ega.

Kalit so'zlar: Gidrotexnika inshootlari, suv sathi, avtomatlashtirish, BC547 tranzistori, monitoring, kanal va zovurlar, suv tejash texnologiyalari, datchik, signalizatsiya.

Abstract: This article discusses the design of an automated system for remote monitoring and control of water levels in hydraulic structures, particularly canals and drainage ditches. The main objective of the research is to develop a device based on BC547 transistors and low-cost electronic components that provides notifications when the water level reaches a certain threshold and enables visual monitoring of the process. The proposed technical solution offers high efficiency in the rational use of water resources, flood prevention, and the digitalization of irrigation systems.

Keywords: Hydraulic structures, water level, automation, BC547 transistor, monitoring, canals and drainage ditches, water-saving technologies, sensor, signaling system.

Аннотация: В данной статье рассматривается проект автоматизированной системы дистанционного мониторинга и управления уровнем воды в гидротехнических сооружениях, в частности в каналах и дренажных коллекторах. Основной целью исследования является разработка устройства на основе транзисторов BC547 и недорогих электронных компонентов, которое обеспечивает оповещение при достижении водой определённого уровня и позволяет осуществлять визуальный мониторинг процесса. Предлагаемое техническое решение обладает высокой эффективностью в рациональном использовании водных ресурсов, предотвращении наводнений и цифровизации ирригационных систем.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, уровень воды, автоматизация, транзистор BC547, мониторинг, каналы и дренажные коллекторы, водосберегающие технологии, датчик, сигнализация.

Kirish: O'zbekiston Respublikasi suv xo'jaligini rivojlantirishning 2020 – 2030 yillarga mo'ljallangan konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida. So'nggi yillarda yer va suv resurslaridan samarali foydalanish, suv resurslarini boshqarish tizimini takomillashtirish, suv xo'jaligi obyektlarini modernizatsiya qilish va rivojlantirish bo'yicha izchil islohotlar amalga oshirilmoqda. Shu bilan birga, global iqlim o'zgarishi, aholi sonining va iqtisodiyot tarmoqlarining o'sishi, ularning suvga bo'lgan talabi yil sayin oshib borishi tufayli suv resurslarining taqchilligi yildan-yilga kuchayib bormoqda. Foydalanilgan o'rtacha yillik suv miqdori 51 - 53 mlrd kub metrni, jumladan, 97,2 foizi daryo va soylardan, 1,9 foizi kollektor tarmoqlaridan, 0,9 foizi esa yer ostidan foydalanib, ajratilgan suv olish limitiga nisbatan 20 foizga qisqargan. Respublikada 2020 - 2030-yillarda aholini va iqtisodiyotning barcha tarmoqlarini suv bilan barqaror ta'minlash, sug'oriladigan yerlarning meliorativ holatini yaxshilash, suv xo'jaligiga bozor tamoyillari va mexanizmlarini hamda raqamli texnologiyalarni keng joriy etish, suv xo'jaligi obyektlarining ishonchli ishlashini ta'minlash hamda yer va suv resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish maqsadi ilgari surilgan [1].

Mavzuning dolzarbligi. Bugungi kunda global iqlim o'zgarishi va suv resurslarining tanqisligi sharoitida gidrotexnika inshootlarini modernizatsiya qilish hamda suvni boshqarishda raqamli texnologiyalarni joriy etish ustuvor vazifalardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, O'zbekiston kabi agrar-sanoat yo'nalishidagi mamlakatlarda irrigatsiya va melioratsiya tizimlarining samaradorligini oshirish bevosita suv sathini aniq o'lchash va monitoring qilish jarayonlariga bog'liq. An'anaviy usullar bilan suv sathini nazorat qilish ko'p vaqt va inson resursini talab etadi, shuningdek, favqulodda holatlarda tezkor qaror qabul qilish imkoniyatini cheklaydi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Gidrotexnika inshootlarini avtomatlashtirish masalalari ko'plab olimlar tomonidan tadqiq etilgan. Masalan, gidrotexnik inshootlarda suv sarfi va sathini hisoblashning matematik modellari hamda gidravlik formulalari (Manning va Shezi formulalari kabi) klassik gidravlika fanining asosi hisoblanadi. Biroq, zamonaviy bosqichda ushbu modellarni elektron sensorlar va mikrokontrollerlar bilan integratsiya qilish dolzarb bo'lib qolmoqda. Xususan, NASAning GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) sun'iy yo'ldosh tizimlari global miqyosda suv resurslarini kuzatishda inqilobiy yangilik kiritgan bo'lsada, kichik va o'rta o'lchamdagi kanal hamda zovurlar uchun arzon, lokal nazorat tizimlarini yaratish hali ham muhim ahamiyatga ega.

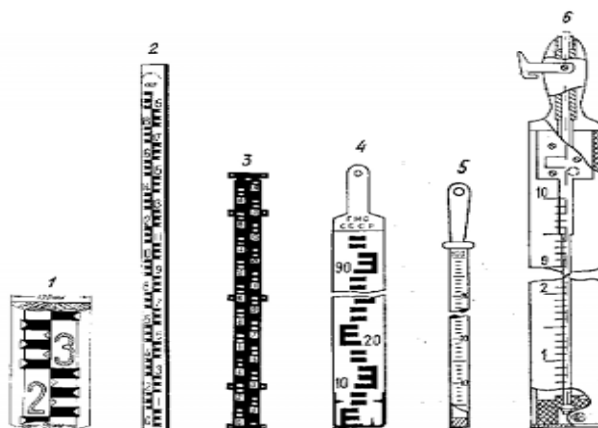
Tadqiqotning maqsadi va vazifalari. Ushbu maqolaning asosiy maqsadi tannarxi past va samaradorligi yuqori bo'lgan suv sathi nazorati qurilmasini loyihalashtirish. Bu qurilma o'zining yuqori sezuvchanligi va ishonchliligi bilan ajralib turadi, bu esa gidrotexnika inshootlarida (kanallar, suv omborlari va zovurlar) sathning o'zgarishini real vaqt rejimida kuzatish imkonini beradi.

Ilmiy yangiligi. Taklif etilayotgan model murakkab va qimmatbaho skada (SCADA) tizimlaridan farqli o'laroq, mahalliy sharoitda oson tayyorlanadigan, ekspluatatsiya qilish sodda bo'lgan arzon elektron komponentlar majmuasidan iborat. Bu loyiha kanal va zovurlarda suv sathini kuzatish, suv toshib ketishining oldini olish hamda suv oqimini nazorat qilishga yordam beradigan oddiy va foydali texnik yechim sifatida ishlab chiqilgan. Shuningdek, loyiha orqali oddiy elektron komponentlar yordamida amaliy muammoni hal qilish mumkinligi ko'rsatib beriladi.

Tizim quyidagi vazifalarni bajarishga qaratilgan:

1. Suv sathining kritik nuqtalarini aniqlash va signalizatsiya berish.
2. Inson omilini kamaytirish orqali monitoring jarayonini avtomatlashtirish.

3. Irrigatsiya tizimlarida suv isrofini kamaytirish va toshqin xavfining oldini olish.



1-rasm. Suv sathini o'lchash reykasining turlari

Suv sathini o'lchash reykasi suv o'lchash joyiningng ajralmas bo'lib, daryolar, ko'llar, kanallar va suv qirg'oq soxillarida qismi omborlari zonasida, suv sathining balandligini o'lchash uchun ishlatiladi. Ularning : 1-3 doimiy , 4-6 portativ , turlari mavjud. Bunday suv o'lchash joyining asosiy o'lchov jihozi suv o'lchash reykasidir. Ular temirdan, po'latdan, yog'ochdan, yasalgan, olib yuriladigan, tindirgichli bo'lishi mumkin. Ularni suv sathining tebranishi keskin bo'lmagan suv ob'ektlarida qurish tavsiya etiladi.[2]

Suv o'lchash joyida quyidagi kuzatishlar olib boriladi:

1. Suv sathining balandligi.
2. Suv harorati
3. Loyqalikka namuna olish
4. Muzlash holatini kuzatish
5. To'lqin balandligini kuzatish (faqat ko'l va suv omborlarida).[4]

Gidrometrik kuzatishlarning asosiy muddatlari qilib soat 08:00 va 20:00 qabul qilingan. Suvni o'lchash joyini ochayotganda uning aholi yashayotgan joydan uzoqligi inobatga olinadi.[4]

BC547 kuchaytirgich sifatida-Tranzistorlar **faol hududda** ishlayotganda kuchaytirgich vazifasini bajaradi. U quvvat, kuchlanish va tokni turli konfiguratsiyalarda kuchaytiradi. **Qo'llanilishi:** Drayver modullari, masalan, Relay Driver, LED drayveri va boshqalar.Audio kuchaytirgichlar, signal kuchaytirgichlari kabi kuchaytirgich modullari va boshqalar. [3]

2-rasm.Qurilma maketi

Qurilma uchun ishlatilgan detallar. BC547 tranzistor-Elektr signalini kuchaytiradi Sensor simlari suvga teganda kelgan kichik tokni kuchaytirib LED yoki buzzer ni ishlashiga yordam beradi.



LED chiroq-Suv sathini ko'rsatib beradi. Har bir LED suvning ma'lum darajasini bildiradi. Rezistor (qarshilik)- Elektr tokini cheklaydi. LED va tranzistorlarga ortiqcha tok kelishini oldini oladi. Qurilmaning xavfsiz ishlashiga yordam beradi. Piezo Buzzer-Suv darajasi juda ko'payganda yoki oxirgi sathga yetganda ogohlantirish beradi.

Datchiklarning joylashuvi va kontaktlar. Datchiklar zanglamaydigan po'lat yoki mis simlardan iborat bo'lib, ular kanalning vertikal devori bo'ylab turli sathlarda (masalan: 25%, 50%, 75% va 100%) o'rnatiladi. Suv o'tkazuvchanlik xususiyatiga ega bo'lgani uchun, u umumiy manfiy (-) qutb va tranzistor asosi orasidagi zanjirni yopadi.

Maketni yaratish va sinash. Laboratoriya sharoitida qurilmaning maketi yig'ildi. Bunda 9V quvvat manbai, BC547 tranzistorlari, 1 kOm va 10 kOm li rezistorlar hamda turli rangdagi svetodiodlardan foydalanildi. Sinovlar shuni ko'rsatdiki, datchiklar orasidagi masofa 10-15 sm bo'lganda ham tizim barqaror signal uzatadi.

Vizual va tovushli monitoring. Suv sathi kritik nuqtaga (100% to'lish) yetganda, nafaqat qizil LED yonadi, balki pyezo-buzzer orqali tovushli signal beriladi. Bu operatorga masofadan turib favqulodda holat haqida ogohlantirish imkonini beradi.

Datchiklarni o'rnatish usullari:

- **Beton kanallarda:** Datchiklar kanal devoriga mahkamlanadi.
- **Tuproq o'zanlarda:** Maxsus qoziqli datchik konstruksiyasi qo'llaniladi. Tuproq namligi ta'sirida xato signallar bermasligi uchun datchik uchlari tuproqdan kamida 5 sm masofada, ochiq oqimda bo'lishi ta'minlanadi.



3-rasm. Qurilmani kelajakda amaliy qo'llanilishi

Maketni real hayotga ko'chirganimizda ishlatiladigan materiallar va texnik yechimlar. Ushbu loyihani amaliyotga tatbiq etish va real ish sharoitiga moslashtirish jarayonida qurilmaning ishonchliligi hamda chidamliligini ta'minlash uchun quyidagi materiallar va texnik o'zgarishlardan foydalaniladi:

- **Boshqaruv paneli:** Qurilmaning laboratoriya nusxasidagi plastik panel o'rniga, sanoat standartlariga mos keladigan, yuqori himoya darajasiga ega (IP65) maxsus elektr shiti qo'llanilgan. Bu elektron komponentlarning tashqi ta'sirlardan himoyalangan holda xavfsiz ishlashini ta'minlaydi.
- **Indikatsiya va signalizatsiya:** Maketdagi kichik svetodiodlar o'rniga yuqori yorug'lik quvvatiga ega AD16 turidagi sanoat signal chiroqlari o'rnatildi. Ranglar va vazifalar original sxema

asosida saqlab qolindi: suv sathi to'lganida (Full) qizil chiroq porlaydi va maxsus buzzer yordamida ovozli signal beriladi.

- Boshqaruv elementlari: Qurilmani ishga tushirish va to'xtatish uchun original maketdagi qizil rangli rokker ON/OFF tugmasi va uning joylashuv tartibi professional konstruksiyada ham o'z holicha saqlab qolindi.
- Datchik ustuni va o'lchov tizimi: Suv sathini aniqlovchi qism plastik idish va lineyka o'rniga, inshoot devoriga metall xomutlar yordamida mahkamlanadigan oq PVX quvurlardan yasalgan datchik ustuni bilan almashtirildi. Maketdagi metall lineyka shkalasi ustun yuzasiga o'yib tushirilgan bo'lib, ulanish nuqtalarida zanglamaydigan po'latdan yasalgan murvatli kontaktlar ishlatilgan.
- Energiya ta'minoti va himoya: Barcha elektr simlari germetik gofra quvurlar ichiga joylashtirildi. Qurilmaning elektr energiyasi sarfini qoplash va avtonom ishlashini ta'minlash maqsadida inshootning yuqori qismiga kichik quyosh paneli o'rnatish ko'zda tutildi.

Xulosa. O'tkazilgan tajriba-konstruktorlik ishlari natijasida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Texnik samaradorlik: BC547 tranzistorlari va oddiy elektron komponentlar asosida ishlab chiqilgan avtomatlashtirilgan tizim gidrotexnika inshootlarida suv sathini masofadan turib monitoring qilish imkoniyatini to'liq namoyon etdi. Qurilmaning signalizatsiya tizimi (LED va piezo-buzzer) suv sathining kritik darajalarini yuqori aniqlikda qayd etib, favqulodda vaziyatlarning oldini olishda ishonchli vosita bo'lib xizmat qiladi.
2. Iqtisodiy va amaliy jihatlar: Taklif etilayotgan yechim qimmatbaho xorijiy analoglardan o'zining arzonligi va ekspluatatsiya qilishning soddaligi bilan ajralib turadi. Bu esa ushbu tizimni nafaqat yirik gidrouzellarda, balki mahalliy fermer xo'jaliklari va ichki sug'orish tarmoqlarida ham keng ko'lamda joriy etish imkonini beradi.
3. Innovatsion yondashuv: Ushbu loyiha oddiy muhandislik g'oyasidan boshlanib, amaliy mehnat natijasida gidrotexnika inshootlarini raqamlashtirishga qaratilgan foydali qurilmaga aylantirildi. Tadqiqot davomida nazariy hisob-kitoblar va amaliy sinovlarning uyg'unligi kutilgan natijani berdi.
4. Istiqbollar: Kelajakda ushbu tizimni simsiz aloqa (IoT) modullari bilan integratsiya qilish orqali, ma'lumotlarni markaziy dispetcherlik xizmatiga real vaqt rejimida uzatish va suv resurslarini boshqarishni yanada takomillashtirish mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni. "O'zbekiston Respublikasi suv xo'jaligini rivojlantirishning 2020-2030-yillarga mo'ljallangan konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida". PF-6024-son. 10.07.2020 y.
2. TIQXMMI-MTU Gidrologiya va gidrogeologiya kafedrasida dotsenti Nazaraliyev Dilshod Validjanovichni Suv o'lchash postlari va Suv sathini kuzatadigan va o'lchaydigan asboblari va qurilmalar mavzusidagi slaydidan.
3. <https://components101.com/transistors/bc547-transistor-pinout-datasheet>
4. S.Karimov, A.Akbarov, U.Jonqobilov "Gidrologiya, gidrometriya va oqim hajmini rostdash"
5. Гаппаров Ф.А., Мансуров С.Р. Жанубий Сурхон сув омбори сув юзасидан бўлаётган буғланишни аниқлаштириш. “Ўзбекистон қишлоқ ва сув хўжалиги” журнали Махсус сони, № 12, Ташкент-2020 й. 38-39 б. qxjurnal.uz
6. Гаппаров Ф.А., Мансуров С.Р. “Сув омборлари фойдали ҳажмининг ўзгаришини аниқлаш бўйича тадқиқотлар”. “Агро илм” журнали, №3 (91), Ташкент-2023. 36-38 б. www.qxjurnal.uz
7. Furkat Gapparov, and Safar Mansurov “Investigations on determination of changes in inactive volume of water reservoirs (case study of South Surkhan water reservoir)”. E3S Web of Conferences 401, 01011 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340101011>

DOI 10.5281/zenodo.20179228

DINAMIK SISTEMALARNING BOSHLANG'ICH TUSHUNCHALARI (QO'ZG'ALMAS NUQTA HAQIDAGI TEOREMA VA UNING MISOLLARDAGI TAHLILLARI)

Solayeva Mehribon Norimonovna

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti,

“Tizimli tahlil va matematik modellash kafedra katta o'qituvchisi.”

m.solayeva@uwed.uz.

Qo'zg'almas nuqta haqidagi teorema.

Qo'zg'almas nuqta deb $F(x_0) = x_0$ shartini qanoatlantiradigan x_0 nuqtaga aytiladi. E'tibor bering, $F^2(x_0) = F(F(x_0)) = F(x_0) = x_0$ va umuman olganda, $F^n(x_0) = x_0$. Shunday qilib, qo'zg'almas nuqtaning orbitasi $x_0, x_0, x_0, \dots$ ko'rinishidagi o'zgarmas ketma-ketlikdan iborat. [3, 4]

Yuqorida [3, 4] maqolada qo'zg'almas nuqta va uni topish haqida fikr yuritgan edik. Endilikda ushbu maqolada biz qo'zg'almas nuqtalarni topish va nuqtaning xususiyatlarini o'rganib chiqishga harakat qilamiz. Qo'zg'almas nuqtalarni topishning eng oddiy mezonlaridan biri matematik analizning quyidagi muhim faktidan kelib chiqadi:

Oraliq qiymat haqidagi teorema (The Intermediate Value Theorem). Faraz qilaylik, $F:[a,b] \rightarrow \mathbb{R}$ funksiya uzluksiz bo'lsin. y_0 qiymati $F(a)$ va $F(b)$ orasida yotsin. U holda $[a,b]$ intervalida shunday x_0 nuqta mavjudki, unda $F(x_0) = y_0$ bo'ladi.

Soddaroq aytganda, bu teorema bizga uzluksiz funksiya $[a,b]$ intervalida $F(a)$ va $F(b)$ orasidagi barcha qiymatlarni qabul qilishini aytadi. Buning bevosita natijasi quyidagicha:

Qo'zg'almas nuqta haqidagi teorema (Fixed Point Theorem). Faraz qilaylik, $F:[a,b] \rightarrow [a,b]$ funksiya uzluksiz bo'lsin. U holda $[a,b]$ oraliqda F uchun kamida bitta qo'zg'almas nuqta mavjud.

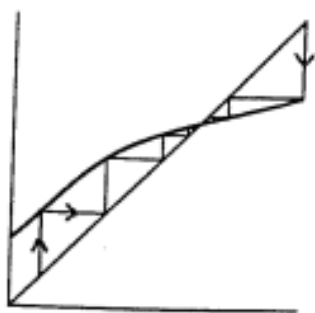
Jalb qilish va Itarish (Attraction and Repulsion)

Qo'zg'almas nuqtalarning bir-biridan keskin farq qiluvchi ikki turi mavjud: **jalb qiluvchi** va **itruvchi** qo'zg'almas nuqtalar.

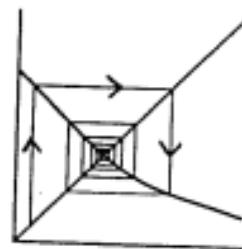
Ta'rif. Faraz qilaylik, x_0 nuqta F funksiya uchun qo'zg'almas nuqta bo'lsin. U holda:

- Agar $|F'(x_0)| < 1$ bo'lsa, x_0 **jalb qiluvchi (attracting)** qo'zg'almas nuqta deyiladi.
- Agar $|F'(x_0)| > 1$ bo'lsa, x_0 **itruvchi (repelling)** qo'zg'almas nuqta deyiladi.
- Nihoyat, agar $|F'(x_0)| = 1$ bo'lsa, qo'zg'almas nuqta **neytral** yoki **befarq (indifferent)** deb ataladi.

Ushbu terminologiyaning geometrik asosi grafik tahlil orqali tushuntiriladi. Quyidagi a,b-rasmdagi grafiklarni ko'rib chiqamiz. Bu funksiyalarning ikkalasi ham x_0 nuqtada qo'zg'almas nuqtaga ega va qo'zg'almas nuqtalar jalb qiluvchidir.



a rasm



b rasm

Yuqoridagi barcha tushunchalarning tahlilini quyida bir nechta misollar yordamida ko'rib chiqamiz.

Misol: Quyidagi funktsiyani barcha qo'zg'almas nuqtalarni toping va ularni tortuvchi (attracting), itaruvchi (repelling) yoki neytral turlarga ajrating.

$$F(x) = x^2 - \frac{x}{2}$$

Yechish: Ushbu misolni yechish uchun eng avva oldingi [3, 4] maqolalarda tahlil qilib o'tganimiz kabi qo'zg'almas nuqtalarni topib olamiz, buning uchun $F(x_0) = x_0$ tenglama yechimini topamiz.

$$x^2 - \frac{x}{2} = x \Rightarrow x^2 - \frac{3x}{2} = 0$$

$$x \left(x - \frac{3}{2} \right) = 0 \Rightarrow x_1 = 0, x_2 = \frac{3}{2}$$

Ko'rinib turibdiki berilgan funktsiyaning ikkita qo'zg'almas nuqtalari mavjud bo'lib, endi biz ushbu nuqtalarni itaruvchi yoki jalb qiluvchiligi yuqoridagi teoremdan aniqlaymiz, ya'ni berilgan funktsiyadan hosila olib topilgan qo'zg'almas nuqtalardagi qiymatini hisoblaymiz.

$$F'(x) = 2x - \frac{1}{2} \Rightarrow F'(0) = -\frac{1}{2} \text{ va } F'\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{5}{2}$$

Ko'rinib turibdiki ushbu qiymatlardan berilgan funktsiyaning 1- qo'zg'almas ya'ni nol nuqtasi jalb qiluvchi va ikkinchi qo'zg'almas nuqtasi itaruvchi ekan.

Misol: Berilgan $F(x) = x^4 - 4x^2 + 2$ funktsiyani barcha qo'zg'almas nuqtalarni toping va ularni tortuvchi (attracting), itaruvchi (repelling) yoki neytral turlarga ajrating.

Yechish: ushbu misol yechimi ham huddi yuqoridagi kabi tahlil qilinadi, shuning uchun biz quyida misol yechimini to'g'ridan-t'g'ri berib ketamiz va to'la tahlil qilmaymiz.

$$x^4 - 4x^2 + 2 = x \Rightarrow x^4 - 4x^2 - x - 2 = 0$$

$$x^2(x-2)(x+2) - (x+2) = 0$$

$$(x+2)(x^3 - 2x^2 - 1) = 0$$

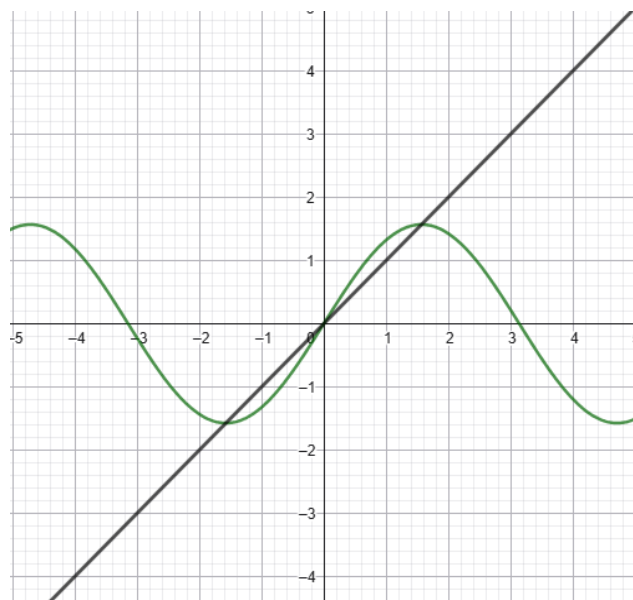
Ushbu tenglamadan ko'rinadiki berilgan funktsiyaning birinchi qo'zg'almas nuqtasi $x_1 = -2$ ga teng va ikkinchi. Uchunchi to'rtinchi qo'zg'almas nuqtalarini topish uchun ma'lum bur matematik dasturlardan foydalanamiz va $x_2 = 2,2025$ ga teng bo'lgan yechim kelib chiqadi. Bundan tashqari bu berilgan funktsiyaning ikkita kompleks sonlardagi yechimlari mavjud. Biz hozircha berilgan funktsiyaning faqat haqiqiy qo'zg'almas nuqtalarini tekshiramiz.

$$F'(x) = 4x^3 - 8x \Rightarrow F'(-2) = -32 + 16 = -16, F'(2,2025) \approx 42,74 - 17,62 = 25,12$$

Funktsiya hosilasini topilgan qo'zg'almas nuqtalardagi qiymatlariga ko'ra berilgan funktsiyaning har ikkita haqiqiy qo'zg'almas nuqtalari itaruvchi ekan.

Misol: Berilgan $F(x) = \frac{\pi}{2} \sin x$ funksiyani barcha qo'zg'almas nuqtalarni toping va ularni tortuvchi (attracting), itaruvchi (repelling) yoki neytral turlarga ajrating.

Yechish: $\frac{\pi}{2} \sin x = x \Rightarrow$ ushbu tenglamaning yechimini ikki funksiya grafik tahlili orqali topish ham mumkin bo'lib,



Grafik tahlildan ko'rinib turibdiki ushbu funksiyaning 3 ta qo'zg'almas nuqtalari mavjud va ular $x_1 = -\frac{\pi}{2}$, $x_2 = 0$, $x_3 = \frac{\pi}{2}$ larga teng bo'lib, endi berilgan funksiyaning hosilasini topilgan qo'zg'almas nuqtadagi qiymatlarini tekshirib ko'ramiz.

$$F'(x) = \frac{\pi}{2} \cos x \Rightarrow F'(-\frac{\pi}{2}) = 0, F'(0) = \frac{\pi}{2} \text{ va } F'(\frac{\pi}{2}) = 0$$

Tengliklar o'rinli bo'lib yuqoridagi ta'rifga asosan berilgan funksiya $x_1 = -\frac{\pi}{2}$, $x_3 = \frac{\pi}{2}$ qo'zg'almas nuqtalari jalb qiluvchi qo'zg'almas nuqtalar va $x_2 = 0$, qo'zg'almas nuqta esa itaruvchi qo'zg'almas nuqtalar ekan.

Foydalanilgan adabiyotlar.

- 1) Devaney, Robert L., A first course in chaotic dynamical systems: theory and experiment 1992
- 2) Rozikov U. A., Solaeva M.N., Behavior of trajectories of a quadratic operator splitted to uncountable linear operators. {it Lobachevskii Journal of Mathematics.} 2023, Vol. 44, No. 7, p. 2910-2915.
- 3) Solayeva Mehribon Norimonovna. Dinamik sistemalarning boshlang'ich tushunchalari (qo'zg'almas nuqta va siklik nuqtalar) va ularni misollardagi tahlillari. Latin American Journal of Education <https://lajoe.org/index.php/LAJoe/article/view/1371>
- 4) Solayeva Mehribon Norimonovna. Basic Concepts of Dynamical Systems and Their Analysis in Examples. American Journal of Applied Science and Technology (ISSN: 2771-2745). <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume06Issue04-14>

DINAMIK SISTEMALARNING BOSHLANG'ICH TUSHUNCHALARI (QO'ZG'ALMAS NUQTA HAQIDAGI TEOREMANING DVRIY NUQTALAR UCHUN TADBIQI VA UNING MISOLLARDAGI TAHLILLARI)

Solayeva Mehribon Norimonovna

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti,

“Tizimli tahlil va matematik modellashirish kafedra katta o'qituvchisi.”

m.solayeva@uwed.uz.

G'aniyev Asrorbek Barhayot o'g'li, Xayrullayev Ne'matulla O'rinboy o'g'li

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, XIM fakulteti 2-kurs talabalari.

Qo'zg'almas nuqta haqidagi teorema.

Qo'zg'almas nuqta deb $F(x_0) = x_0$ shartini qanoatlantiradigan x_0 nuqtaga aytiladi. E'tibor bering, $F^2(x_0) = F(F(x_0)) = F(x_0) = x_0$ va umuman olganda, $F^n(x_0) = x_0$. Shunday qilib, qo'zg'almas nuqtaning orbitasi $x_0, x_0, x_0, \dots$ ko'rinishidagi o'zgarmas ketma-ketlikdan iborat. [3, 4]

Oraliq qiymat haqidagi teorema (The Intermediate Value Theorem). Faraz qilaylik, $F:[a,b] \rightarrow \mathbb{R}$ funksiya uzluksiz bo'lsin. y_0 qiymati $F(a)$ va $F(b)$ orasida yotsin. U holda $[a,b]$ intervalida shunday x_0 nuqta mavjudki, unda $F(x_0) = y_0$ bo'ladi.

Soddaroq aytganda, bu teorema bizga uzluksiz funksiya $[a,b]$ intervalida $F(a)$ va $F(b)$ orasidagi barcha qiymatlarni qabul qilishini aytadi. Buning bevosita natijasi quyidagicha:

Qo'zg'almas nuqta haqidagi teorema (Fixed Point Theorem). Faraz qilaylik, $F:[a,b] \rightarrow [a,b]$ funksiya uzluksiz bo'lsin. U holda $[a,b]$ oraliqda F uchun kamida bitta qo'zg'almas nuqta mavjud.

Jalb qilish va Itarish (Attraction and Repulsion)

Qo'zg'almas nuqtalarning bir-biridan keskin farq qiluvchi ikki turi mavjud: **jalb qiluvchi** va **itaruvchi** qo'zg'almas nuqtalar.

Ta'rif. Faraz qilaylik, x_0 nuqta F funksiya uchun qo'zg'almas nuqta bo'lsin. U holda:

- Agar $|F'(x_0)| < 1$ bo'lsa, x_0 **jalb qiluvchi (attracting)** qo'zg'almas nuqta deyiladi.
- Agar $|F'(x_0)| > 1$ bo'lsa, x_0 **itaruvchi (repelling)** qo'zg'almas nuqta deyiladi.
- Nihoyat, agar $|F'(x_0)| = 1$ bo'lsa, qo'zg'almas nuqta **neytral** yoki **befarq (indifferent)** deb ataladi.

Misol: Quyidagi funksiyani barcha qo'zg'almas nuqtalarni toping va ularni tortuvchi (attracting), itaruvchi (repelling) yoki neytral turlarga ajrating.

$$F(x) = x^2 - \frac{x}{2}$$

Yechish: Ushbu misolni yechish uchun eng avva oldingi [3, 4] maqolalarda tahlil qilib o'tganimiz kabi qo'zg'almas nuqtalarni topib olamiz, buning uchun $F(x_0) = x_0$ tenglama yechimini topamiz.

$$x^2 - \frac{x}{2} = x \Rightarrow x^2 - \frac{3x}{2} = 0$$

$$x\left(x - \frac{3}{2}\right) = 0 \Rightarrow x_1 = 0, x_2 = \frac{3}{2}$$

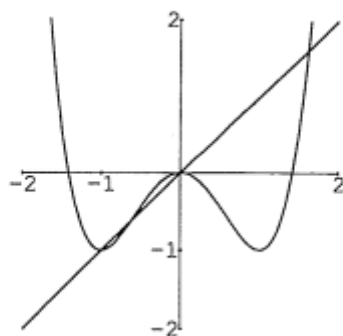
Ko'rinib turibdiki berilgan funksiyaning ikkita qo'zg'almas nuqtalari mavjud bo'lib, endi biz ushbu nuqtalarni itaruvchi yoki jalb qiluvchiligini yuqoridagi teoremdan aniqlaymiz, ya'ni berilgan funksiya hosila olib topilgan qo'zg'almas nuqtalardagi qiymatini hisoblaymiz.

$$F'(x) = 2x - \frac{1}{2} \Rightarrow F'(0) = -\frac{1}{2} \text{ va } F'\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{5}{2}$$

Ko'rinib turibdiki ushbu qiymatlardan berilgan funksiyaning 1- qo'zg'almas ya'ni nol nuqtasi jalb qiluvchi va ikkinchi qo'zg'almas nuqtasi itaruvchi ekan.

Davriy nuqtalar

Qo'zg'almas nuqtalar kabi, davriy nuqtalar ham **tortuvchi** (attracting), **itaruvchi** (repelling) yoki **neytral** turlarga tasniflanishi mumkin. Bu yerdagi matematik hisob-kitoblar faqat bir oz murakkabroq, xolos. Ya'ni oldingi [2] maqolada ta'kidlab o'tganimizdek tub davri n ga teng bo'lgan davriy nuqtalarni topish uchun $F^n(x_0) = x_0$ tenglama yechimini topish kerak. Agar bu tenglamaning yechimlari to'plamini topa olsak u holda yuqoridagi ta'rifga asosan har bir davriy nuqtalarning tortuvchi yoki itaruvchiligini topish mumkin. Masalan $F(x) = x^2 - 1$ funksiyasi $0, -1, 0, -1, \dots$ orbitasiga ega bo'lgan 2-davrlı tortuvchi siklga ega.



Buni aniqlash uchun yuqorida ta'kidlab o'tganimiz kabi $F^2(x) = (x^2 - 1)^2 - 1 = x^4 - 2x^2$ funksiyasining grafigini o'rganamiz. E'tibor bering, F^2 funksiyasi to'rtta qo'zg'almas nuqtaga ega: bular F ning ikkita qo'zg'almas nuqtasi, shuningdek, 0 va -1 davriy nuqtalaridir. F^2 ning hosilasi, ya'ni $4x^3 - 4x$, ham 0 da, ham -1 da nolga teng bo'lishiga e'tibor bering, ya'ni $(F^2)'(0) = (F^2)'(-1) = 0$.

Bu shuni ko'rsatadiki, ushbu ikki nuqta F ning ikkinchi iteratsiyasi uchun tortuvchi qo'zg'almas nuqtalar hisoblanadi. Ya'ni, F^2 iteratsiyasi ostida 0 yoki -1 yaqinidagi nuqtalarning orbitalari shu

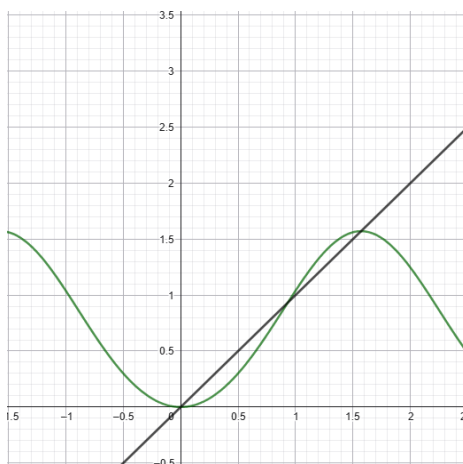
nuqtalarga intiladi. Biroq, F iteratsiyasi ostida, bu orbitalar 2-davrli siklga yaqinlashgani sayin u yoqdan-bu yoqqa (oldinga va orqaga) almashinib turadi.

Misol: Ushbu $F(x) = \frac{\pi}{2} \cos x$ funksiya uchun nol nuqtasi davriy orbitada yotadi. Ushbu orbitani tortuvchi, itaruvchi yoki neytral turga ajrating.

Yechish: Ushbu funksiyaning eng avval ikkinchi davriy nuqtalari to'plamini aniqlab olamiz, buning uchun $F^2(x) = \frac{\pi}{2} \cos(\frac{\pi}{2} \cos x)$ ikkinchi itaratsiya funksiyasini x ga tenglashtirib quyidagi tenglamaning yechimini topish lozim.

$$\frac{\pi}{2} \cos(\frac{\pi}{2} \cos x) = x$$

Avvalo ushbu tenglamaning grafik tahlilini ko'rib chiqsak,



Grafikdan ko'rinib turibdiki berilgan funksiyaning ikki davriy nuqtalari 3 ta ekan. Ya'ni $x_1 = 0$, $x_2 = \frac{\pi}{2}$, $x_3 = 0,9045$ bo'lib, endi huddi yuqoridagi kabi ushbu funksiyaning ikki davriy nuqtalarining tortuvchi yoki itaruvchi ekanligini aniqlab chiqamiz. Buning uchun tabiiy ravishda $(F^2)'(x_0)$ ni tekshiramiz.

$$(F^2)'(x_0) = \frac{\pi}{2} \sin(\frac{\pi}{2} \cos x) \cdot \frac{\pi}{2} \sin x = \frac{\pi^2}{4} \sin(\frac{\pi}{2} \cos x) \cdot \sin x \Rightarrow$$

$$(F^2)'(0) = 0, (F^2)'(\frac{\pi}{2}) = 0, (F^2)'(0,9045) \approx 0,8176$$

Ushbu qiymatlardan ko'rinadiki berilgan funksiyaning barcha ikkinchi davriy nuqtalari tortuvchi bo'lar ekan.

Ushbu g'oyalar bizni tortishish va itarilish ta'riflarini tabiiy ravishda davrlarga kengaytirishga undaydi: n -davrlar nuqta, agar u F^n uchun tortuvchi (itaruvchi) qo'zg'almas nuqta bo'lsa, **tortuvchi**

(itruvchi) davriy nuqta hisoblanadi. Bu darhol davriy orbitalar ham tortuvchi, ham itruvchi nuqtalarni o'z ichiga olishi mumkinmi degan savolni keltirib chiqaradi. Quyida ko'rib chiqishimizcha, matematik hisob-kitoblar buning iloji yo'qligini ko'rsatadi.

n -davrlı x_0 nuqtasi tortuvchi yoki itruvchi ekanligini aniqlash uchun biz F^n ning x_0 nuqtasidagi hosilasini hisoblashimiz kerak. F ning n -chi iteratsiyasi (bu F ning n -chi darajasi emas) uchun hosila hisoblashda zanjir qoidasidan foydalanish talab etiladi. Matematik analizdan bizga ma'lumki, agar F va G differensiallanuvchi funksiyalar bo'lsa, u holda ularning kompozitsiyasi hosilasi quyidagicha aniqlanadi:

$$(F \circ G)'(x) = F'(G(x)) \cdot G'(x)$$

Xususan,

$$(F^2)'(x_0) = F'(F(x_0)) \cdot F'(x_0) = F'(x_1) \cdot F'(x_0)$$

va

$$(F^3)'(x_0) = F'(F^2(x_0)) \cdot (F^2)'(x_0) = F'(x_2) \cdot F'(x_1) \cdot F'(x_0)$$

Zanjir qoidasini $n - 1$ marta qo'llash orqali quyidagini topamiz:

Faraz qilaylik, $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$ nuqtalar F funksiyasining n davrlı siklida yotsin va $x_i = F^i(x_0)$ bo'lsin. U holda:

$$(F^n)'(x_0) = F'(x_{n-1}) \cdot \dots \cdot F'(x_1) \cdot F'(x_0)$$

E'tibor bering, ushbu formula bizga F^n ning x_0 nuqtasidagi hosilasi shunchaki orbitadagi barcha nuqtalarda olingan F hosilalarining ko'paytmasiga teng ekanligini aytadi. Bu shuni anglatadiki, biz avval F^n uchun umumiy formulani hisoblab o'tirishimiz shart emas. Bizga faqat F ning hosilasini topish va unga mos ravishda $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$ qiymatlarini qo'yib, ko'paytirish kifoya qiladi.

Misol. Ushbu $F(x) = -\frac{3}{2}x^2 + \frac{5}{2}x + 1$ funksiya uchun nol nuqta qanday davrda yotishini tekshiring va bu davriy nuqtalarni tortuvchi va itaruvchilikka tekshiring.

Yechish: $F(x) = -\frac{3}{2}x^2 + \frac{5}{2}x + 1$ funksiyasini ko'rib chiqaylik. 0 nuqtasi 3-davrlı siklida yotadi,

chunki $F(0) = 1$, $F(1) = 2$ va $F(2) = 0$ Bizda $F'(x) = -3x + \frac{5}{2}$, shuning uchun

$$F'(0) = \frac{5}{2}, F'(1) = -\frac{1}{2} \text{ va } F'(2) = -\frac{7}{2}.$$

$$\text{Bundan: } (F^3)'(0) = F'(2) \cdot F'(1) \cdot F'(0) = \left(\frac{-7}{2}\right) \left(\frac{-1}{2}\right) \left(\frac{5}{2}\right) = \frac{35}{8} > 1$$

Ekanligi kelib chiqadi va nol nuqta itaruvchi tub davri uchga teng bo'lgan nuqtaligi kelib chiqadi.

Misol. Quyidagi funksiyalarning har biri uchun nol nuqtasi davriy orbitada yotadi. Ushbu orbitani tortuvchi, itaruvchi yoki neytral turga ajrating.

$$a. F(x) = -\frac{1}{2}x^3 - \frac{3}{2}x^2 + 1$$

Yechish: $F(x) = -\frac{1}{2}x^3 - \frac{3}{2}x^2 + 1$ funksiya uchun nol boshlang'ich nuqta 3 davriy siklda yotadi chunki, $F(0) = 1$, $F(1) = -1$, $F(-1) = 0$ bo'lib, nol nuqtaning orbitasi $0, 1, -1, 0, 1, -1, \dots$ endi nol nuqtaning tortuvchi yoki itaruvchiligi tekshiramiz.

$$F'(x) = -\frac{3}{2}x^2 - 3x \Rightarrow F'(0) = 0, F'(1) = -\frac{9}{2}, F'(-1) = \frac{3}{2}$$

$$(F^3)'(0) = F'(2) \cdot F'(1) \cdot F'(0) = 0 \cdot \left(-\frac{9}{2}\right) \cdot \left(\frac{3}{2}\right) = 0 < 1$$

Bundan ko'rinadi boshlang'ich nol nuqta uchunchi davriy tortuvchi nuqta

Foydalanilgan adabiyotlar.

- 1) Devaney, Robert L., A first course in chaotic dynamical systems: theory and experiment 1992
- 2) Rozikov U. A., Solaeva M.N., Behavior of trajectories of a quadratic operator splitted to uncountable linear operators. {it Lobachevskii Journal of Mathematics.} 2023, Vol. 44, No. 7, p. 2910-2915.
- 3) Solayeva Mehribon Norimonovna. DINAMIK SISTEMALARNING BOSHLANG'ICH TUSHUNCHALARI (QO'ZG'ALMAS NUQTA VA SIKLIK NUQTALAR) VA ULARNI MISOLLARDAGI TAHLILLARI. Latin American Journal of Education <https://lajoe.org/index.php/LAJoE/article/view/1371>
- 4) Solayeva Mehribon Norimonovna. Basic Concepts of Dynamical Systems and Their Analysis in Examples. American Journal of Applied Science and Technology (ISSN: 2771-2745). <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume06Issue04-14>

[DOI 10.5281/zenodo.20236585](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236585)

IQTISODIY QAROR QABUL QILISHDA SONLI OPTIMALLASHTIRISH USULLARINING QO'LLANILISHI

Turdiyev Shodmon¹

¹Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti "Tizimli tahlil va matematik modellashtirish"
kafedrasi katta o'qituvchisi
Abdulhamidov Izzatbek²

²Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti "Jahon iqtisodiyoti va xalqaro iqtisodiy
munosabatlar" yo'nalishi 1-kurs talabasi

Annotatsiya: Zamonaviy biznes muhitining jadal o'zgarib borayotgan davrida, tashkilot muvaffaqiyati uchun aniq qarorlar qabul qilish nihoyatda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Mazkur

tadqiqot biznesda qarorlar qabul qilish aniqligini oshirishning kuchli vositasi sifatida matematik iqtisodiyotning strategik integratsiyasini o'rganadi. Iqtisodiy nazariyalarni matematik metodologiyalar bilan birlashtirgan matematik iqtisodiyot fani murakkab biznes strategiyasi qarorlarini modellashtirish va tahlil qilish uchun tizimli asosni taqdim etadi. Ushbu tadqiqot matematik iqtisodiyotning nazariy asoslariga chuqur kirib boradi hamda uning real biznes jarayonlaridagi amaliy tatbiqini tadqiq qiladi. Matematik modellar, optimallashtirish usullari va statistik tahlillardan foydalanish orqali korxonalar bozor dinamikasi, resurslarni taqsimlash, xavf-xatarlarni baholash va shunga o'xshash yo'nalishlarda tushunchalarga ega bo'lishlari mumkin. Tadqiqotdan ko'zlangan asosiy maqsad - qaror qabul qiluvchilarga asoslangan strategiyalarni shakllantirishda ko'maklashadigan, noaniqliklarni kamaytiradigan va biznesning umumiy samaradorligini maksimal darajaga ko'taradigan tizimli yondashuvni ishlab chiqishdan iborat.

KIRISH

Bugungi tezkor va o'zgaruvchan biznes muhitida matematik iqtisodiyot qaror qabul qilishning muhim ilmiy asosiga aylanmoqda. U iqtisodiy jarayonlarni matematik modellar, optimallashtirish usullari va statistik tahlillar orqali o'rganib, eng maqbul qarorlarni aniqlash imkonini beradi. Matematik iqtisodiyot yordamida resurslarni samarali taqsimlash, xavf-xatarlarni baholash hamda strategik rejalashtirish jarayonlari aniq va ishonchli amalga oshiriladi. Shuningdek, prognozlash modellari orqali kelajakdagi iqtisodiy holatlar oldindan baholanib, korxonaning raqobatbardoshligi va barqaror rivojlanishi ta'minlanadi. Shu bois matematik iqtisodiyot qaror qabul qilishni intuitiv yondashuvdan ilmiy asoslangan tizimga aylantiradi.

Matematik usullar orqali biznes qarorlarini qabul qilish

Iqtisodiyotdagi turli jarayonlar o'zaro chambarchas bog'liq bo'lib, biridagi o'zgarish boshqasiga ta'sir ko'rsatadi. Masalan, daromad oshishi iste'mol hajmiga ta'sir etsa, mahsulot narxining ko'tarilishi talabning kamayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli iqtisodiy jarayonlarni aniq tahlil qilishda matematik usullar muhim ahamiyat kasb etadi.

Matematika iqtisodiyotda miqdoriy tahlil olib borish, statistik ko'rsatkichlarni hisoblash va iqtisodiy jarayonlarni modellashtirish imkonini beradi. Daromad, xarajat, narx, talab va foyda kabi iqtisodiy o'zgaruvchilar matematik formulalar orqali ifodalanadi hamda ular o'rtasidagi bog'liqlik o'rganiladi.

Shuningdek, matematik usullar yordamida iqtisodiy ko'rsatkichlarni baholash, kelajakdagi tendensiyalarni prognoz qilish va samarali rejalashtirish amalga oshiriladi. Optimallashtirish usullari esa foydani oshirish, xarajatlarni kamaytirish va resurslardan samarali foydalanishda muhim vosita bo'lib xizmat qiladi. Shu bois matematik iqtisodiyot biznes boshqaruvi va strategik qarorlar qabul qilishning muhim ilmiy asoslaridan biri hisoblanadi.

Biznes-iqtisodiyotida matematikaning amaliy ahamiyati

Muvaffaqiyatli biznesning asosi - bu matematika, aniqrog'i biznes-matematikadir. Ushbu soha matematik tushunchalarni real biznes vaziyatlariga tatbiq etib, asosiy e'tiborni foyda, zarar, foiz stavkalari va moliyaviy formulalarga qaratadi. Ushbu vositalar biznesga foyda marjasini hisoblash, inventarizatsiyani optimallashtirish va soliq stavkalarini belgilash kabi vazifalarni samarali boshqarish imkonini beradi. Shuningdek, biznes-matematika statistika bilan chambarchas bog'liq bo'lib, u biznes muammolarini hal qilishda qimmatli ma'lumotlarni taqdim etadi.

Pul yoki tovar almashinuvi jarayonida foyda, zarar, foizlar va chegirmalarni tushunish o'ta muhimdir. Har qanday biznesning moliyaviy manzarasini to'g'ri baholash uchun kuchli matematik mantiq va asosiy formulalarni bilish talab etiladi.

Biznes-matematikasining asosiy harakatlantiruvchi kuchi foyda va zarardir. Mahsulot tannarxi foydalilikni ta'minlash uchun sinchkovlik bilan hisoblanadi. Bunda kutilayotgan foyda, naqd pul chegirmalari va savdo chegirmalari muhim rol o'ynaydi. Bugungi kunda buxgalteriya, marketing, sotuvlar prognozi va moliyaviy tahlil kabi bo'limlarning barchasi muvaffaqiyatli qarorlar qabul qilishda matematikaning kuchiga tayanadi.

Biznes-matematikasining asosiy tushunchalari

Biznes-matematikasida o'rganiladigan eng muhim mavzular ro'yxati:

- Foyda va zarar
- Statistika
- Oddiy va murakkab foizlar
- Foiz stavkalari
- Kreditlar va qarzarlar
- Ustama va chegirmalar
- Soliqlar va soliq qonunchiligi
- Diskontlash omili
- Annuitetlar
- Sug'urta
- Kredit tizimi
- Amortizatsiya
- Kelajakdagi va joriy qiymat
- Moliyaviy hisobotlar

Tadqiqot usullari

Ushbu tadqiqotda tahliliy va tavsifiy metodlardan foydalanildi. Ma'lumotlar kitoblar, ilmiy maqolalar va boshqa manbalardan to'plandi. Tadqiqot davomida matematik iqtisodiyotning biznesda qaror qabul qilishdagi ahamiyati, uning samaradorligi hamda amaliy qo'llanilishi tahlil qilindi va misollar orqali yoritildi. Natijada matematik usullar strategik va aniq qarorlar qabul qilishda muhim omil ekanligi ko'rsatib berildi.

Mavzuga doir misollar:

1-misol

Kompaniya reklama kampaniyasini boshlaganda, odatda haftalik sotuvlar hajmi keskin ko'tariladi. Reklama kampaniyasining ta'siri susaygan sari, ushbu kompaniya hisobiga amalga oshirilayotgan sotuvlar ham kamaya boshlaydi.

Masalan, faraz qilaylik, kompaniya reklama kampaniyasi davridagi haftalik daromati

$$S(t) = \frac{100t}{t^2 + 100}.$$

Bunda t - kompaniya boshlanganidan beri o'tgan haftalar soni. Kompaniya daromad funksiyasi qachon o'sayotganini, qachon kamayayotganini va daromad qachon maksimal nuqtaga yetishini aniq belgilab olishni istaydi.

Yechim: Berilgan masalani bosqichma-bosqich ishlab chiqamiz. Bizda haftalik savdo tushumi funksiyasi berilgan:

$$S(t) = \frac{100t}{t^2 + 100}$$

Bu yerda t - reklama kampaniyasi boshlangandan beri o'tgan haftalar soni. Funksiyaning qachon o'sishi, kamayishi va qachon maksimal nuqtaga chiqishini aniqlashimiz kerak. Buning uchun funksiyaning hosilasini olamiz.

1. Hosila olish (Keltirma qoidasi bo'yicha)

Bo'linmaning hosilasi formulasidan foydalanamiz:

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$$

$$u = 100t \text{ bundan } u' = 100$$

$$v = t^2 + 100 \text{ bundan } v' = 2t$$

$$S'(t) = \frac{100(t^2 + 100) - 100t(2t)}{(t^2 + 100)^2}$$

$$S'(t) = \frac{-100t^2 + 10000}{(t^2 + 100)^2} \text{ bundan } u = 100t$$

2. Kritik nuqtani topish

Maksimal nuqtani topish uchun hosilani nolga tenglashtiramiz:

$$10000 - 100t^2 = 0$$

$$100t^2 = 10000$$

$$t^2 = 100$$

$$t = 10$$

(vaqt manfiy bo'lishi mumkin emas, shuning uchun $t = -10$ ni olmaymiz).

3. Savdo tushumining tahlili

Endi hosilaning ishorasiga qarab funksiyaning o'zgarishini aniqlaymiz:

1) Maksimal daromad: $t = 10$ bo'lganda, ya'ni 10-haftada savdo tushumi eng yuqori nuqtaga chiqadi.

2) O'shish oralig'i: $t < 10$ bo'lganda, hosila musbat ($S'(t) > 0$). Demak, reklama boshlangandan to 10-haftagacha daromad ortib boradi.

3) Kamayish oralig'i: $t > 10$ bo'lganda, hosila manfiy ($S'(t) < 0$). Demak, 10-haftadan keyin reklama effekti pasayib, daromad kamaya boshlaydi.

Xulosa:

1. Savdo hajmi maksimal bo'ladi: 10-haftada.
2. Ortish vaqti: 0-haftadan 10-haftagacha.
3. Kamayish vaqti: 10-haftadan boshlab.

2-misol

Aytaylik, sayyohlik agentligi ma'lum bir tur uchun guruhda 25 kishi bo'lganda kishi boshiga \$300 haq oladi. Biroq, 25 kishidan oshgan har bir qo'shimcha odam uchun narx kishi boshiga \$10 ga kamaytiriladi. Daromadni (tushumni) maksimallashtiradigan guruh hajmini aniqlash uchun agentlik daromad modelini yaratishi kerak. Bunday model yordamida maksimal daromadni aniqlashda matematik analiz (hisob) usullari foydali bo'lishi mumkin.

Yechim: Ushbu misolni ham avvalgisiga o'xshab ishlaymiz.

Guruh hajmini va daromadni qanday hisoblash yanada tushinarliroq bo'lishi uchun, quyidagi bosqichlarni ko'rib chiqamiz:

1. O'zgaruvchini aniqlash:

x 25 kishidan ortiq bo'lgan qo'shimcha odamlar soni bo'lsin.

Demak, jami odamlar soni: $(25 + x)$

2. Narx funksiyasi:

Har bir kishi uchun narx: $(300 - 10x)$

Daromad funksiyasi (R):

$$\text{Daromad} = (\text{Odamlar soni}) \times (\text{Kishi boshiga narx})$$

$$R(x) = (25 + x)(300 - 10x)$$

Matematik analiz yordamida yechish:

Maksimal daromadni topish uchun biz funksiyaning hosilasini olib, uni nolga tenglashtiramiz:

1) Qavslarni ochamiz: $R(x) = 7500 + 300x - 250x - 10x^2 = -10x^2 + 50x + 7500$

2) Hosilani hisoblaymiz: $R'(x) = -20x + 50$

3) Nolga tenglashtiramiz: $-20x + 50 = 0$ tenglikdan $20x = 50$ $x = 2.5$

Bu shuni anglatadiki, guruh hajmi 27 yoki 28 kishi (2.5 odam bo'lmagani uchun) bo'lganda agentlik eng yuqori daromadga erishadi.

XULOSA

Biznes qarorlarini qabul qilishda matematik hisob-kitoblar muhim ahamiyatga ega bo'lib, ular kompaniyalarga aniq va asosli qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Matematik usullar yordamida

korxonaning moliyaviy holatini tahlil qilish, foyda va zararlarni baholash, investitsiya samaradorligini aniqlash hamda resurslardan oqilona foydalanish mumkin bo'ladi.

Shuningdek, inventarizatsiyani boshqarish, risklarni baholash va optimal narx belgilash jarayonlarida ham matematik yondashuvlar muhim rol o'ynaydi. Turli formulalar va iqtisodiy ko'rsatkichlar orqali korxonaning samaradorligi aniqlanadi va strategik rejalashtirish takomillashtiriladi.

Xulosa qilib aytganda, matematik iqtisodiyot va biznes hisob-kitoblari zamonaviy biznes boshqaruvining ajralmas qismi hisoblanadi. Ular nafaqat hozirgi holatni tahlil qilish, balki kelajakdagi natijalarni prognoz qilish va barqaror rivojlanishni ta'minlashga ham xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Al-Sulaiti, K., Aldereai, O., & Dar, I. B. (2022). "Biznes matematikasining moliya, marketing, turizm va xulq-atvor fanlarida qo'llanilishi: Qisqa sharh". https://www.researchgate.net/publication/370866369_Application_of_Business_Mathematics_in_Finance_Marketing_Tourism_and_Behavioural_Sciences_A_Mini_Review
2. Yang, X. (2017). "Matematikaning moliyaviy matematikadagi uchta muhim tatbiqi". *American Journal of Industrial and Business Management*, 07(09), 1096–1100. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2017.79077>
3. Xarshbarger, R. J., & Reynolds, J. J. (2018). "Boshqaruv, hayotiy va ijtimoiy fanlar uchun matematik tatbiqlar (9-nashr)". Cengage Learning.
4. Agustini, M. Y. D. H. (1970). "Boshqaruv iqtisodiyoti - Iqtisodiy nazariya asosida qarorlar qabul qilish". Unika Repository. <http://repository.unika.ac.id/19966/>

[DOI 10.5281/zenodo.20236808](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236808)

KICHIK VA O'RTA KORXONALAR UCHUN USD/UZS VALYUTA JUFTLIGI O'ZGARUVCHANLIGINI GARCH VA MONTE-KARLO MODELLARI YORDAMIDA BAHOLASH HAMDA XEDJLASH STRATEGIYALARINI ASOSLASH

Umarova Shoira, Po'latov Olmosbek

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti

Annotatsiya. Ushbu tezisda O'zbekiston sharoitida USD/UZS valyuta kursi o'zgaruvchanligini miqdoriy baholash va kichik hamda o'rta biznes subyektlari uchun xedjlash strategiyalarini tanlash masalasi yoritiladi. Tadqiqotda Monte-Karlo simulyatsiyasi, GARCH(1,1) modeli, Value at Risk (VaR), Expected Shortfall (ES) va fyuchers payoff strukturasi qo'llanildi. Natijalar oddiy normal taqsimotga asoslangan yondashuv valyuta riskini past baholashi, GARCH modeli esa og'ir quyruqlar va volatillik klasterlashuvini aniqroq aks ettirishini ko'rsatadi. Amaliy xulosa sifatida aksariyat SME subyektlari uchun bank forvardi va spot strategiyalari nisbatan xavfsizroq, fyuchers esa faqat yetarli kapital, tajriba va risk-menejment mavjud bo'lganda maqsadga muvofiq ekani asoslanadi.

Kalit so'zlar: valyuta riski, USD/UZS, xedjlash, GARCH(1,1), Monte-Karlo simulyatsiyasi, VaR, Expected Shortfall, spot, fyuchers, SME.

O'zbekiston iqtisodiyotining jahon bozorlariga integratsiyalashuvi chuqurlashgan sari valyuta risklarini boshqarish masalasi yanada dolzarb bo'lib bormoqda. Eksport-import operatsiyalarining katta qismi AQSH dollarida amalga oshirilishi, so'm kursining bozor omillariga sezgirliigi va tashqi savdo hajmining kengayishi korxonalar moliyaviy natijalarida valyuta kursi omilining ulushini oshiradi. Bitiruv ishida qayd etilganidek, 2024-yilda O'zbekiston tashqi savdo aylanmasi 65 mlrd AQSH dollaridan oshgan, so'nggi uch yil ichida USD/UZS kursi qariyb 20 foizga o'zgargan. Bu holat, ayniqsa, kichik va o'rta biznes subyektlari uchun muhimdir, chunki ular ko'pincha

cheklangan kapital, yetarli bo'lmagan moliyaviy savodxonlik va professional risk-menejment infratuzilmasining sustligi bilan tavsiflanadi.

Yirik korxonalar valyuta kursidagi keskin tebranishlarni moliyaviy zaxiralar, diversifikatsiya yoki professional derivativ strategiyalar orqali yumshata oladi. SME subyektlari esa import xomashyosi, eksport tushumi yoki xorijiy valyutadagi majburiyatlar sababli kurs riskiga to'g'ridan-to'g'ri duch keladi. Shu bois valyuta kursi bo'yicha nafaqat umumiy prognoz, balki ehtimoliy zarar chegarasini miqdoriy baholash, ya'ni "qancha zarar, qanday ehtimollik bilan yuzaga kelishi mumkin?" degan savolga javob berish zarur. Ushbu yondashuv xedjlash vositasini tanlashni subyektiv qaror emas, balki hisob-kitobga asoslangan boshqaruv qaroriga aylantiradi.

O'zbekiston Respublika Valyuta Birjasida USD/UZS fyucherslari savdosi yo'lga qo'yilgan bo'lsa-da, SME subyektlari orasida bunday instrumentlardan foydalanish keng tarqalmagan. Buning sabablari sifatida margin call xavfi, moliyaviy instrumentlarning murakkabligi, likvidlik va maslahat xizmatlari yetishmasligini ko'rsatish mumkin. Shu nuqtai nazardan, spot, forvard va fyuchers strategiyalarini risk hamda kapital talabi bo'yicha solishtirish amaliy ahamiyatga ega.

Tadqiqotning maqsadi Monte-Karlo simulyatsiyasi va GARCH modeli asosida USD/UZS valyuta kursining risk profilini baholash hamda spot va fyuchers xedjlash strategiyalarining samaradorligini qiyosiy tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot obyekti sifatida O'zbekiston Respublikasi Valyuta Birjasida sotiladigan USD/UZS fyuchers shartnomalari va USD/UZS spot kursi tanlangan. Tadqiqot predmeti esa valyuta riskini miqdoriy baholash usullari hamda xedjlash strategiyalarining SME subyektlari uchun amaliy qo'llanish imkoniyatidir.

Metodologik jihatdan ishda bir nechta o'zaro bog'liq usullar qo'llanildi. Birinchidan, USD/UZS kursining kunlik qiymatlari asosida logarifmik daromadlar hisoblandi. Ikkinchidan, daromadlar taqsimoti tavsifiy statistika, normallik testlari va avtokorrelyatsiya mezonlari orqali tekshirildi. Uchinchidan, 10 000 ta ssenariy asosida 30 kunlik Monte-Karlo simulyatsiyasi o'tkazildi. To'rtinchidan, volatillik klasterlashuvini hisobga olish uchun GARCH(1,1) modeli qo'llanildi. Beshinchidan, risk miqdorini baholashda 95% va 99% ishonch darajalarida VaR hamda ES ko'rsatkichlari hisoblandi. Oltinchidan, UZCE fyuchers shartnomasi uchun payoff strukturasi tuzilib, spot va fyuchers pozitsiyalari kapital talabi hamda risk darajasi bo'yicha solishtirildi.

Monte-Karlo simulyatsiyasi valyuta kursining kelajakdagi ehtimoliy trayektoriyalarini yaratish imkonini beradi. Oddiy simulyatsiyada daromadlar normal taqsimotga ega deb faraz qilinadi. Biroq moliyaviy vaqt qatorlarida ko'pincha og'ir quyruqlar, assimetriya va volatillik klasterlashuvi kuzatiladi. GARCH yondashuvi aynan ushbu kamchilikni bartaraf qiladi: shartli dispersiya oldingi davr shoki va oldingi davr volatilligiga bog'liq tarzda modellashtiriladi. Natijada model tinch davr va inqiroz davrlaridagi o'zgaruvchanlik farqini yaxshiroq aks ettiradi.

Tahlil natijalari USD/UZS kursi daromadlari normal taqsimotdan sezilarli darajada farq qilishini ko'rsatdi. Cho'qqililik ko'rsatkichi 4,832 ga teng bo'lib, bu normal taqsimotdagi 3 qiymatidan yuqori. Jarque-Bera testi natijasi ham ($JB = 245,3$; $p < 0,01$) daromadlar normal taqsimotga mos kelmasligini tasdiqlaydi. Demak, faqat normal taqsimotga asoslangan risk modeli ekstremal zararlar ehtimolini yetarli darajada hisobga olmaydi. Kvadratik daromadlar avtokorrelyatsiyasi esa volatillik klasterlashuvi mavjudligini ko'rsatadi, bu GARCH modelidan foydalanishni asoslaydi.

USD/UZS kunlik daromadlari uchun GARCH(1,1) modeli Student-t taqsimoti asosida baholandi. Natijalarda yuqori α parametri (0,7402) yangi shoklarning volatillikka kuchli ta'sirini, nisbatan past β parametri (0,0905) esa volatillikning tezroq so'nishini ko'rsatadi. Student-t taqsimotining erkinlik darajasi $v = 5,08$ bo'lib, bu og'ir quyruqlar mavjudligini anglatadi. Bunday tuzilma rivojlanayotgan valyuta bozorlariga xos bo'lib, kutilmagan kurs sakrashlari ehtimolini oddiy normal modelga nisbatan realroq baholaydi.

Oddiy Monte-Karlo simulyatsiyasi 10 000 ta ssenariy va 30 kunlik prognoz gorizontida 95% VaRni -3,34%, 99% VaRni esa -7,22% darajasida baholadi. GARCH asosidagi Monte-Karlo simulyatsiyasi

esa 95% VaRni -4,58%, 99% VaRni -8,93% darajasida ko'rsatdi. Demak, oddiy normal model 30 kunlik valyuta riskini taxminan 1,2–1,7 foiz punktga kam baholaydi. Bu SME subyektlari uchun muhim signal: xedjlash qarorlari faqat o'rtacha kurs prognoziga emas, ekstremal holatlarda yuzaga keladigan yo'qotish ehtimoliga ham asoslanishi kerak.

Ko'rsatkich	Oddiy Monte-Karlo	GARCH Monte-Karlo
Taqsimot farazi	Normal	Student-t, $\nu = 5,08$
Prognoz gorizonti	30 kun	30 kun
95% VaR	-3,34%	-4,58%
99% VaR	-7,22%	-8,93%
Talqin	Riskni pastroq baholaydi	Og'ir quyruqlarni hisobga oladi

Tadqiqotda UZCE da sotiladigan USD/UZS U25 fyuchers shartnomasi tahlil qilindi. Bitim narxi $F = 13\,144,40$ UZS/USD, lot hajmi 1 000 USD, nominal hajm esa 5 000 000 USD deb olindi. Fyuchers payoff strukturasi quyidagicha ifodalanadi: $\text{Payoff} = (ST - 13\,144,40) \times 5\,000 \times 1\,000$. Ushbu formula fyuchers pozitsiyasining foyda yoki zarari yakuniy spot kurs ST bilan oldindan belgilangan fyuchers narxi o'rtasidagi farqqa bog'liq ekanini ko'rsatadi.

Risk metrikalari spot va fyuchers strategiyalari o'rtasida sezilarli farq borligini ko'rsatdi. Spot pozitsiyada 95% VaR -3 398 mln UZS, 99% VaR -7 334 mln UZS, ES 95% esa -4 126 mln UZSni tashkil etdi. Fyuchers pozitsiyasida 95% VaR -6 784 mln UZS, 99% VaR -9 145 mln UZS, ES 95% esa -8 368 mln UZS bo'ldi. Bir xil nominal hajmda fyuchersning risk ko'rsatkichlari spotga nisbatan yuqoriroq chiqdi. Buning asosiy sababi leverage ta'siridir: fyuchersda investor to'liq nominalni emas, faqat marjani qo'yadi, lekin foyda va zarar to'liq nominal bo'yicha shakllanadi.

Ko'rsatkich	Spot	Fyuchers	Farq
95% VaR, mln UZS	-3 398	-6 784	+99,8%
99% VaR, mln UZS	-7 334	-9 145	+24,7%
ES 95%, mln UZS	-4 126	-8 368	+102,8%
Boshlang'ich kapital	65 mlrd UZS	≈6,5 mlrd UZS	-90%
Leverage	1:1	1:10	+900%

Ssenariy tahlilida USD kursi 14 000 UZS/USD ga oshganda spot va fyuchers pozitsiyalari bir xil nominalda +4 280 mln UZS foyda beradi; kurs 12 000 UZS/USD ga tushganda esa -5 720 mln UZS zarar yuzaga keladi. Mutlaq foyda va zarar bir xil bo'lsa-da, kapitalga nisbatan natijalar tubdan farq qiladi: spot strategiyada foyda 6,5%, zarar -8,8% atrofida bo'lsa, fyuchersda bu ko'rsatkichlar mos ravishda 65% va -88% darajasiga yetadi. Shu sababli fyuchers kichik kapital bilan katta pozitsiyani boshqarish imkonini bersa-da, noto'g'ri qo'llanganda SME subyektlari uchun xavfli bo'lishi mumkin.

Tadqiqot natijalari O'zbekistondagi kichik va o'rta biznes subyektlari uchun xedjlash vositasini tanlashda kapital hajmi, risk toleransi, moliyaviy tajriba va operatsiya muddatini birgalikda baholash zarurligini ko'rsatadi. Cheklangan kapitalga ega, import yoki eksport to'lovlari 1–3 oy ichida amalga oshiriladigan SME subyektlari uchun bank forvardi va spot bozor eng maqbul vositalar hisoblanadi. Forvard marja talab qilmaydi, muddatlar moslashtiriladi va kelajakdagi pul

oqimini oldindan aniqlashtirish imkonini beradi. Spot bozor esa eng sodda va tushunarli vosita bo'lib, kurs bo'yicha noaniqlikni darhol bartaraf etadi, lekin to'liq summa oldindan talab qilinadi.

Fyuchers instrumentlaridan foydalanish faqat ma'lum shartlar bajarilganda tavsiya etiladi. Birinchidan, korxonada kamida 10 mlrd UZ\$dan yuqori kapital zaxirasi va margin call holatlarini qoplash imkoniyati bo'lishi kerak. Ikkinchidan, moliyaviy bozorlarda kamida ikki yillik tajribaga ega mutaxassis mavjud bo'lishi lozim. Uchinchidan, korxona ichida risk limitlari, stop-loss qoidalari va VaR/ES monitoringi joriy etilishi zarur. Aks holda, fyuchers xedjlash vositasi bo'lish o'rniga spekulativ zarar manbaiga aylanishi mumkin.

Amaliy jihatdan SME subyektlari uchun quyidagi ketma-ketlik maqbul: avvalo valyuta pozitsiyasini aniqlash, keyin 30 kunlik yoki shartnoma muddatiga mos VaR va ESni hisoblash, so'ngra spot, forvard yoki fyuchers variantlari bo'yicha kapital talabi va maksimal zarar chegarasini taqqoslash. Agar korxona riskni minimal xarajat va past murakkablik bilan kamaytirishni xohlasa, bank forvardi ustuvor bo'lishi kerak. Agar korxonada yetarli likvidlik mavjud bo'lsa, spot strategiyasi xavfsiz tanlovdir. Fyuchers esa yuqori riskni qabul qila oladigan, tajribali va nazorat tizimiga ega korxonalar uchun cheklangan hajmda qo'llanishi mumkin.

O'tkazilgan tahlil USD/UZ\$ kursi bo'yicha valyuta riskini baholashda klassik normal taqsimotga asoslangan modellar yetarli emasligini ko'rsatdi. Daromadlar taqsimotida og'ir quyruqlar va volatillik klasterlashuvi mavjud bo'lgani sababli, GARCH(1,1) modeli hamda Student-t taqsimotiga asoslangan Monte-Karlo simulyatsiyasi real bozor sharoitlariga yaqinroq natija beradi. Xususan, GARCH asosidagi yondashuv 95% va 99% VaR qiymatlarini oddiy simulyatsiyaga nisbatan yuqoriroq baholaydi, bu esa ehtiyotkor risk boshqaruvi uchun muhimdir.

Spot va fyuchers strategiyalarini solishtirish shuni ko'rsatdiki, fyuchers kapital talabini 10 baravar kamaytirishi mumkin, ammo leverage ta'siri sababli zarar xavfini ham keskin oshiradi. Shu bois SME subyektlari uchun "eng arzon" yoki "eng kam kapital talab qiladigan" instrument har doim ham eng xavfsiz instrument emas. Tadqiqotning asosiy amaliy xulosasi shundan iboratki, O'zbekistondagi aksariyat SME subyektlari uchun bank forvardlari va spot bozor birinchi navbatdagi xedjlash vositalari sifatida ko'rilishi lozim; fyuchers esa faqat yetarli kapital, tajriba va ichki risk-menejment tizimi mavjud bo'lganda qo'llanishi mumkin.

Ushbu yondashuv banklar, birja mutaxassislari va real sektor korxonalari uchun USD/UZ\$ bo'yicha risk metrikalarini hisoblash, xedjlash qarorlarini asoslash va valyuta riskini boshqarish madaniyatini shakllantirishda amaliy qo'llanilishi mumkin. Kelgusida tadqiqotni opsiyon strategiyalari, turli eksport-import sektorlarining valyuta pozitsiyalari hamda stress-test ssenariylari bilan boyitish maqsadga muvofiqdir.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Bollerslev T. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. Journal of Econometrics, 1986.
2. Hull J.C. Options, Futures, and Other Derivatives. Pearson Education.
3. McNeil A.J., Frey R., Embrechts P. Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools. Princeton University Press.
4. Glasserman P. Monte Carlo Methods in Financial Engineering. Springer, 2004.
5. O'zbekiston Respublikasi Markaziy banki va O'zbekiston Respublika Valyuta Birjasi ma'lumotlari.

DOI 10.5281/zenodo.20236783

The trend of integrating the oil industry with renewable energy sources**Maraimova K.Sh.**

Senior Lecturer, PhD

department of “System analysis and mathematical modeling”

Abstract

The global energy system is rapidly transforming as climate change, rising energy demand, and environmental concerns push the oil and gas industry to adopt renewable energy technologies. This study analyzes key trends and drivers of this transition, emphasizing significant cost reductions in solar and wind energy that have made renewable integration economically viable. Successful projects—such as Equinor’s Hywind Tampen, ADNOC¹¹’s clean-energy initiatives, and Chevron’s Coalinga Solar-to-Steam facility—demonstrate notable reductions in CO₂ emissions and operational costs. Analysis of EU greenhouse gas emissions from 2017 to 2022 also shows steady declines, with several countries achieving reductions exceeding 20%. Despite challenges such as intermittency, high investment costs, and infrastructure adaptation, renewable energy integration is becoming a crucial pathway for achieving environmental sustainability and long-term efficiency in the oil and gas sector.

Keywords

Renewable energy integration; oil and gas industry; solar energy; wind energy; energy transition; carbon emissions reduction; energy sustainability; Hywind Tampen; ADNOC; Chevron Coalinga project; greenhouse gas emissions; clean energy technologies.

The global energy system is currently undergoing a period of significant transformation. Issues related to climate change and global warming, the growing demand for energy, and the increasing impact of environmentally harmful factors are prompting the oil industry to reconsider its strategic approach. Today, many oil companies are striving to achieve ecological and economic sustainability by integrating renewable energy sources into their operations. In this process, energy sources such as solar, wind, geothermal, hydro, and biomass play a key role. According to the International Energy Agency (IEA), in 2023, the share of renewable energy in global energy production exceeded 29%. This has accelerated the transition of the oil industry toward a new direction. Several factors influence the integration of renewable energy sources by oil and gas companies. First and foremost is the critical need to reduce carbon emissions and combat climate change. Additionally, as the cost of renewable energy sources continues to decrease, their integration has become economically viable as well.

Energy Source	Price in 2010(per kWh)	Pirce in 2010(per kWh)	Price Change (%)
Solar PV	\$ 0.36	\$ 0.07	-80%
Onshore Wind	\$ 0.08- \$ 0.14	\$ 0.04- \$ 0.09	-40%
Offshore Wind	\$ 0.16	\$0.07	-50%

Table 1. Changes in the Prices of Solar and Wind Energy. *Integration of Renewable Energy Sources in Oil and Gas Operations a Sustainable Future” by Mohsen Kiamansouri [IntegratingRenewableEnergySolutionsintoOilandGasOperations.ABusinessCaseforSustainableProfitability.pdf](#)

¹¹ Abu Dhabi National Oil Company for Distribution

For example, according to the International Renewable Energy Agency (IRENA), since 2010, the cost of solar photovoltaic (PV) technologies has decreased by 80%, while the cost of wind energy has dropped by 40–50%. These changes have made renewable energy sources significantly more competitive compared to traditional fuels. As a result, oil and gas companies are increasingly encouraged to adopt these technologies in their operations.

Successful Projects

European countries are leading the way in renewable energy initiatives. For example, the *Hywind Tampen* project by Norway's Equinor is the world's first floating offshore wind farm, supplying electricity to oil platforms in the North Sea. The project has a capacity of 88 megawatts (MW) and covers about 35% of the annual electricity needs of five platforms. As a result, approximately 200,000 tons of CO₂ emissions are avoided annually. Although the project cost 7.4 billion Norwegian kroner (about 700 million USD), it is proving to be a worthwhile investment when considering its environmental and economic benefits. In the Middle East, similar efforts are gaining momentum. For instance, the UAE-based company ADNOC transitioned all of its onshore oil facilities to solar and nuclear energy sources starting in 2022. Moreover, it is supplying its offshore platforms with clean energy via HVDC (High Voltage Direct Current) cables. Through these measures, ADNOC aims to reduce carbon emissions from its offshore operations by up to 30%. In North America, especially in the U.S. and Canada, the transition is being implemented more cautiously. A notable example is Chevron's *Coalinga Solar-to-Steam* project in California, which demonstrates the successful integration of renewable energy into the oil industry. This project uses concentrated solar power to produce steam, which is then used in oil extraction processes. As a result, Chevron has been able to cut around 31,000 tons of CO₂ emissions annually. Furthermore, the project has reduced Chevron's operational costs by replacing natural gas with solar power, achieving significant economic efficiency. Additionally, thousands of small-scale solar systems are being used to power remote pumps, SCADA systems, and pipelines, thereby reducing the need for diesel generators and lowering associated costs.

Company	Type of Project Integration	Achievement	Environmental Impact
Chevron	Coalinga Solar-to-Steam Facility	Reduction of 31,000 tons of CO ₂ , improved energy efficiency	Reduction of CO ₂ emissions
Shell	Borssele III/IV Offshore Wind Farm	Energy supply for 825,000 households annually	Utilization of wind energy
Norvegiyaning Equinor	Hywind Tampen	Supplies electricity to oil platforms in the North Sea	Prevents 200,000 tons of CO ₂ emissions
ADNOC (BAA)	ADNOC	Converted oil facilities to solar and nuclear energy	Reduced carbon emissions by up to 30%

Table 2. Successful Renewable Energy Projects

Equinor, *Hywind Tampen Fact Sheet*, 2023 and ADNOC, *All onshore operations powered by clean energy*, 2022 <https://www.equinor.com/news/20230823-hywind-tampen-officially-opened>

From a technological standpoint, the oil industry is actively integrating the following renewable energy technologies:

Solar PV Panels – Used to supply electricity to wells, compressors, and monitoring systems. Their

efficiency is particularly high in sunny regions.

Concentrated Solar Power (CSP) – Utilized to generate steam required for heavy oil extraction using solar energy. A clear example of this is the *Miraah* project in Oman, which cost around \$600 million and supplies 80% of the steam needed.

Wind Energy – Plays a crucial role, especially in offshore platforms. A notable example is the *Hywind Tampen* project.

Hybrid Systems – Combine solar, wind, backup generators, and batteries to ensure uninterrupted 24/7 power supply.

Energy Storage Technologies – Involve batteries, pumped hydro storage, hydrogen production, and other methods to stabilize electricity supply.

However, this integration process also faces a number of challenges.

Intermittency of Solar and Wind Energy – Due to the non-continuous nature of these energy sources, backup systems are required to ensure reliability.

High Initial Costs – Renewable energy projects demand significant capital investment.

Infrastructure Adaptation – Integrating new technologies into existing oil facilities is technically and financially complex.

Political and Economic Uncertainties – Changes in subsidies, carbon taxes, and ESG (Environmental, Social, and Governance) requirements cause companies to proceed cautiously.

EU Country	GHG Emissions in 2017 (million tons)	GHG Emissions in 2022 (million tons)	Change (2017–2022)
Austria	47.6	43.7	-9%
Belgium	71.6	65.2	-9%
Bulgaria	46.6	43.8	-5%
Croatia	13.7	11.6	-15%
Cyprus	5.8	5.8	0%
Czech Republic	84.6	76.9	-9%
Denmark	59.3	53.9	-9%
Estonia	19.1	11.6	-39%
Finland	42.2	33.6	-11%
France	264.3	253.2	-4%
Germany	655.4	542.4	-17%
Greece	56.7	53.8	-5%
Hungary	39.5	35.7	-10%
Ireland	41.7	40.1	-4%
Italy	261.1	247.7	-5%
Latvia	7.2	6.1	-15%
Lithuania	10.1	8	-21%

Luxembourg	7.5	7	-7%
Malta	1.5	1.3	-13%
Netherlands	151	120.3	-20%
Poland	300.2	276.4	-8%
Portugal	49.6	45.2	-9%
Romania	65.5	54.4	-17%
Slovakia	11.9	10.1	-15%
Slovenia	10.6	8.8	-17%
Spain	216.9	181.4	-16%
Sweden	37.4	32.8	-12%
United Kingdom	480	410	-15%

Table 3. Greenhouse Gas (GHG) Emissions of European Union (EU) Countries in 2017 and 2022

Source: Air emissions accounts by NACE Rev. 2 activity [Statistics | Eurostat](#)

The table shows that greenhouse gas (GHG) emissions decreased in most European countries between 2017 and 2022. The average reduction is around 10%, with some countries — such as Estonia, Lithuania, Germany, and the Netherlands — experiencing significant reductions of more than 20%. The largest decrease was observed in Estonia (39%), followed by Germany (17%) and the Netherlands (20%). These countries have implemented serious measures to reduce CO₂ emissions and undergo ecological transformation. In contrast, Cyprus recorded a 0% change, indicating no meaningful policy actions were taken during this period. In major economies such as Germany and the United Kingdom, the reduction in emissions is linked to the development of more environmentally friendly industrial and production processes. The implementation of new energy efficiency technologies and the shift toward renewable energy sources have played a major role in this decline.

In conclusion, the trend of integrating renewable energy sources into the oil industry is rapidly advancing as a response to modern changes in the global energy system. The need to combat climate change and reduce carbon emissions is pushing oil companies to incorporate renewable energy sources into their operations. Moreover, integrating renewable technologies not only promotes environmental sustainability but also enhances economic efficiency. As the prices of solar and wind energy continue to decline, their integration becomes increasingly feasible and attractive.

References

1. M. Kiamansouri, “Integration of Renewable Energy Sources in Oil and Gas Operations a Sustainable Future” EJCMPR. 2025; 4 (1): 111-135.
2. D.Ekechukwu, P.Simpa “Trends, insights, and future prospects of renewable energy integration within the oil and gas sector operations”. May 2024World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences 12(1):152-167
3. <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/toktrapport-en-2023-10>
4. <https://www.equinor.com/news/20230823-hywind-tampen-officially-opened>
5. Air emissions accounts by NACE Rev. 2 activity

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_ainah_r2_custom_13098228/default/table?lang=en

[DOI 10.5281/zenodo.20236796](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236796)

ZAMONAVIY AQSH–XITOIY MUNOSABATLARIDA TAYVAN OMILINING GEOSIYOSIY AHAMIYATI

Murodov Sardor Niyozbek o'g'li

sardor.murad@mail.ru

Annotatsiya

Mazkur maqolada AQSh va Xitoy o'rtasidagi zamonaviy munosabatlarda Tayvan omilining geosiyosiy ahamiyati tahlil qilinadi. Tayvan muammosining tarixiy shakllanishi, XX asr davomida yuz bergan siyosiy jarayonlar, Sovuq urush davridagi qarama-qarshiliklar hamda bugungi xalqaro tizimdagi o'rni ilmiy jihatdan yoritib beriladi. Shuningdek, AQShning Tayvan masalasidagi strategik manfaatlari, Xitoyning "Yagona Xitoy" siyosati va Osiyo-Tinch okeani mintaqasidagi xavfsizlik muammolari tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar:

Tayvan, AQSh, Xitoy, geosiyosat, xalqaro munosabatlar, "Yagona Xitoy" siyosati, xavfsizlik, Osiyo-Tinch okeani mintaqasi.

Bugungi xalqaro munosabatlar tizimida AQSh va Xitoy o'rtasidagi raqobat global siyosatning eng muhim masalalaridan biri hisoblanadi. Ushbu raqobatning markaziy nuqtalaridan biri esa Tayvan masalasidir. Tayvan muammosi nafaqat ikki davlat o'rtasidagi siyosiy qarama-qarshilikni ifodalaydi, balki Osiyo-Tinch okeani mintaqasidagi xavfsizlik va barqarorlikka ham bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Tayvan tarixan Xitoy hududining bir qismi sifatida qaralgan bo'lsada, XX asr o'rtalarida Xitoydagi fuqarolar urushi natijasida orol alohida siyosiy boshqaruv tizimiga ega bo'lib qoldi. Ayniqsa, AQShning Tayvanni qo'llab-quvvatlashi ushbu masalani xalqaro siyosatning dolzarb mavzusiga aylantirdi. Hozirgi davrda Tayvan atrofidagi keskinlikning kuchayib borishi AQSh va Xitoy o'rtasidagi strategik raqobatning yangi bosqichga o'tganligini ko'rsatmoqda.

Tayvan, Xitoy Xalq Respublikasining janubi-sharqiy qirg'og'ida joylashgan orol bo'lib Xitoyning eng katta oroli hisoblanadi. Tarixan Tayvan ko'p asrlar davomida Xitoyga tegishli bo'lgan. Tayvan oroli dastlab "Ichjou" va "Lyutsi" deb atalgan. Tayvan orolini shakllanishi esa XVII asrga borib taqaladi, ayni osha kezlardan Xitoydan janubi-sharqiy qirg'oq tomon xitoylik kochmanchilar ortib borishi natijasida orol otroqlashib boradi va shakllanadi.

Xalqaro maydonda ikkinchi jahon urushi yakunidan so'ng yetakchi mamlakatlar ajralib chiqib boshladi. Bu davr mobaynida Tayvan de-yure hamda de-fakto ni qo'lga kiritgan holda Xitoyga qaytarildi (ko'p yillar mobaynida Xitoy xalqiga tegishli bo'lgan Tayvan oroli 1894-1895-yillar oralig'ida bo'lib o'tgan Xitoy-Yapon mamlakatlari o'rtasida urush natijasida Yaponiya tomonidan istilo qilingan hudud ikkinchi jahon urushi natijalariga ko'ra Yaponiyaning mag'lubiyatga uchrashi orqali 1945-yilga kelib Xitoy mamlakatiga qaytarilib berilgan).

Hozirgi kunda Xitoy hukumati har qanday davlat tomonidan Tayvan hukumatiga ko'rsatilishi mumkin bo'lgan har qanday yordam, mamlakatlar tomonidan qurol-aslahalarni yetkazib berilishi hamda ushbu hududda sotishga urinishlar hamda Tayvan uchun qurol ishlab chiqarish uchun jihozlar yetkazib berilish holatlarga nisbatan har doim keskin qarshilik ko'rsatib kelgan. Xitoy bilan

diplomatik munosabatlarga ega bo'lgan barcha davlatlar suverenitet va hududiy yaxlitlikni o'zaro hurmat qilish, bir-birining ichki ishlariga aralashmaslik tamoyillariga rioya qilishlari, Tayvanga har qanday shaklda va har qanday bahona bilan qurol-yarog' yetkazib berishdan tiyilishlari kerak. Aks holda ularning harakatlari xalqaro munosabatlar normalarini buzish va Xitoyning ichki ishlariga aralashish sifatida baholanadi.¹²

Ming afsuski, ko'p yillardan buyon Tayvan muammosi Osiyo-Tinch okeani mintaqasidagi beqarorlashtiruvchi omil sifatida hanuzgacha saqlanib qolmoqda. Xitoy va Tayvan hududini birlashuvini amalga oshirish nafaqat Xitoyning barqarorligi va rivojlanishiga ta'sir qiladi, balki Xitoyning dunyoning boshqa mamlakatlari bilan do'stona va hamkorlik munosabatlarini yanada mustahkamlashga, Osiyo-Tinch okeani mintaqasida tinchlik va taraqqiyotni ta'minlashga ulkan poydevor yaratadi. Xitoy hukumati xalqaro munosabatlarda mustaqil tinchlikparvar tashqi siyosatni izchil davom ettirib, "Suverenitet va hududiy yaxlitlikni o'zaro hurmat qilish, o'zaro tajovuz qilmaslik, bir-birining ichki ishlariga aralashmaslik, teng huquqlilik va o'zaro munosabatlar" kabi muhim tamoyillarga qat'iy amal qildi. Xalqaro maydonda esa tinch-totuv yashash, dunyoning barcha mamlakatlari bilan do'stona munosabatlarni jadal rivojlantirish hamda hech qachon o'zga mamlakatning ichki ishlariga aralashmaslik siyosatini olib boradi.¹³ O'z navbatida, Xitoy Xalq Respublikasi ham dunyoning barcha mamlakatlari hukumatlaridan Xitoy manfaatlariga rahna solish va ziyon yetkazmaslikni, Xitoyning ichki ishlariga aralashmagan holda suverenitetini tan olishini va Tayvan bilan munosabatlarni to'g'ri yo'lga qo'yish lozimligini so'raydi.

Tayvan muammosining paydo bo'lishi va Xitoy-Tayvan munosabatlarida Amerika omilining ahamiyati.

II jahon urushidan keying vaziyatni tahlil qilib e'tibor qaratadigan bo'lsak, 1940-yillarda Xitoyda siyosiy, mafkuraviy va intellektual vaziyatni shakllanayotganini guvohi bo'lamiz, ushbu jarayon XIX asrning boshlarida mamlakatning mo'tadil rivojlanishdan qotib qolgan davlatdan, kuchli va mustahkam davlat g'oyasiga o'tish bosqichi shakllana boradi. Xitoy mamlakati II jahon urushidan so'ng jadalik bilan o'zini tiklab olishini barcha kutgan bo'lsada, bunday jarayon amalga oshishi qiyinlashib qoladi, bunga esa mamlakatning ikki asosiy kuch Xitoy Kommunistik partiyasi va Xitoyning Gomindan partiyasi o'rtasida hokimiyat uchun keskin raqobat yuzaga kela boshladi.

Ikki partiyaning to'qnashuv jarayonini qaysidir ma'noda kommunistik uyushgan davlat g'oyasi va avtoritar-plyuralistik tizim o'rtasidagi kurash sifatida talqin qilinishi ham mumkin. Xitoydagi ikki ijtimoiy-siyosiy tendentsiya o'rtasidagi qarama-qarshilik aslida "Xitoy g'oyasi" uchun qurolli raqobat sifatida namoyon bo'ladi. Xitoyliklarning o'z-o'zini anglash darajasi milliy-ruh qarashlarining kuchli darajasiga yetadi, ushbu omil yagona mamlakat go'yasi ostidagi birlashishni taminlab beradi.

1950-yillarda Xitoyning siyosiy yo'nalishi bo'yicha bir necha variant mavjud edi: Sovet modelini qabul qilish, AQShga yaqinlashish, neytral "buffer" davlat bo'lib qolish yoki millatchilik siyosatini davom ettirish.¹⁴

II jahon urushi yakunidan so'ng dunyoda ikkita davlat yaqqol gegemonlik uchun kurash boshlaydilar AQSh va SSSR ham birinchi navbatda Xitoy davlatini buffer zonaga aylantirish intilishgan. AQSH bor e'tiborini markaziy hukumatga tasir o'tkazishga intilgan bo'lsa, SSSR o'z navbatida o'zi uchun muhim bo'lgan chegaradosh hududda joylashgan viloyatlarda o'zining mavqeini mustahkamlashga manfaatdor edi. Ammo, XKP va Gomindan o'rtasidagi murosasiz kurashuv Sovet-Amerika davlatlarin o'rtasidagi raqobatni yuzaga keltirishga sabablardan biri bo'lib qoladi. Aynay Xitoyda yuzaga kelgan partiyalar o'rtasidagi o'zaro qarama-qarshiliklar Sovet

¹² <https://www.fmprc.gov.cn/ce/ceby/rus/zt/zgtw/t265038.htm>

¹³ <https://www.fmprc.gov.cn/ce/ceby/rus/zt/zgtw/t265038.htm>

¹⁴ https://revolution.allbest.ru/international/00387098_o.html

hukumatining Xitoy Komunistik Partiyasini, AQSH hukumatini esa Gomindan partiyasini qo‘llab-quvvatlashga harakat qila boshlaydilar.

1950-yilning 14-fevral oyiga kelib esa Xitoy Xaqi Respublikasi va Sovet davlati o‘rtasida “Do‘stlik, ittifoq va o‘zaro yordam to‘g‘risida”gi shartnoma imzolandi, ushbu shartnomada harbiy ittifoq to‘g‘risidagi qoidalar ham mavjud bo‘lgan.¹⁵ Ikki mamlakat o‘rtasida tuzulgan ushbu shartnoma Amerika Qo‘shma Shtatlari va Xitoy Xalq Respublikasi o‘rtasidagi hamkorlik to‘g‘risidagi umidlarni yo‘qatilganligining rasmiy asosi edi.

1960–1970-yillarga kelib esa Tayvan masalasi xalqaro diplomatiyaning eng muhim mavzularidan biriga aylandi. 1971-yilda BMT Bosh Assambleyasining 2758-sonli rezolyutsiyasi qabul qilinib, Xitoyning qonuniy vakili sifatida Pekin hukumati tan olindi va Tayvan BMTdagi o‘rnidan mahrum bo‘ldi. Ushbu voqea Tayvan diplomatik mavqeiga jiddiy ta‘sir ko‘rsatdi hamda “Bir Xitoy” tamoyilining xalqaro maydonda kuchayishiga sabab bo‘ldi. Shundan so‘ng ko‘plab davlatlar Pekin bilan diplomatik aloqalarni o‘rnatish maqsadida Tayvan bilan rasmiy munosabatlarini cheklay boshladilar.

1972-yilda AQSh Prezidenti Richard Nixonning Xitoyga tashrifi va “Shanxay kommyunikesi”ning imzolaniishi Xitoy–AQSh munosabatlarida yangi bosqichni boshlab berdi. Mazkur hujjatda AQSh “Bir Xitoy” siyosatini tan olishini bildirgan bo‘lsa-da, Tayvan bilan norasmiy aloqalarni saqlab qolish imkoniyatini ham qoldirdi. Bu esa Vashingtonning ikki tomonlama siyosatini shakllantirdi: bir tomondan Pekin bilan strategik yaqinlashuv, ikkinchi tomondan esa Tayvan xavfsizligini qo‘llab-quvvatlash.

Xitoy uchun Tayvan bir necha sababga ko‘ra juda muhim hisoblanadi. Birinchidan, Pekin Tayvanni tarixiy va siyosiy jihatdan Xitoyning ajralmas qismi deb biladi. Xitoy hukumati nazarida 1949-yilda yuzaga kelgan ajralish vaqtinchalik holat bo‘lib, mamlakatni qayta birlashtirish “milliy tiklanish” siyosatining asosiy maqsadlaridan biri hisoblanadi. Shu sababli Tayvan masalasi Xitoy uchun nafaqat hududiy, balki milliy suverenitet va davlat birligi masalasidir.

Ikkinchidan, Tayvan strategik jihatdan juda muhim hududda joylashgan. Orol Sharqiy va Janubiy Xitoy dengizlari o‘rtasidagi dengiz yo‘llariga yaqin bo‘lib, Tinch okeaniga chiqishda muhim nuqta hisoblanadi. Agar Pekin Tayvan ustidan to‘liq nazorat o‘rnatasa, u mintaqadagi harbiy va dengiz salohiyatini sezilarli darajada kuchaytirishi mumkin bo‘ladi.

Uchinchidan, Tayvan iqtisodiy va texnologik jihatdan ham katta ahamiyatga ega. Ayniqsa yarimo‘tkazgichlar va mikrochip ishlab chiqarish sohasida Tayvan dunyodagi yetakchi markazlardan biri hisoblanadi. Tayvan kompaniyalar global texnologik ta‘minot zanjirida muhim o‘rin tutadi. Shu sababli Tayvan ustidan nazorat iqtisodiy va texnologik raqobatda ham katta ustunlik beradi.

AQSh uchun esa Tayvan birinchi navbatda strategik va geosiyosiy ahamiyatga ega. Tayvanni Osiyo-Tinch okeani mintaqasidagi muhim hamkor va Xitoy ta‘sirini cheklovchi hudud sifatida ko‘radi. Agar Tayvan Pekin nazoratiga o‘tsa, AQShning Yaponiya, Janubiy Koreya va Filippin kabi ittifoqchilari xavfsizligi ham murakkablashishi mumkin.

Shu bilan birga, AQSh Kongressi “Tayvan bilan munosabatlar to‘g‘risida”gi qonunni qabul qildi. Mazkur hujjat AQShga Tayvanning mudofaa salohiyatini qo‘llab-quvvatlash va orol xavfsizligiga tahdid tug‘ilganda unga yordam berish imkonini berdi. Natijada AQSh Tayvan masalasida rasmiy jihatdan “Bir Xitoy” siyosatini tan olsa-da, amalda Tayvan bilan siyosiy, iqtisodiy va harbiy hamkorlikni davom ettirdi.

Bugungi kunga kelib Tayvan masalasi xalqaro tizimdagi eng murakkab geosiyosiy muammolardan biri bo‘lib qolmoqda. Xitoy Tayvanni o‘z hududining ajralmas qismi sifatida baholab, zarur bo‘lsa kuch ishlatish orqali qayta birlashtirish ehtimolini ham inkor etmaydi. AQSh esa Tayvan bo‘g‘ozida

¹⁵ https://revolution.allbest.ru/international/00387098_o.html

status-kvoning saqlanib qolishini va muammoning tinch yo‘l bilan hal qilinishini qo‘llab-quvvatlaydi. Shu sababli Tayvan masalasi bugungi xalqaro munosabatlarda AQSh–Xitoy strategik raqobatining markaziy nuqtalaridan biri sifatida namoyon bo‘lmoqda.

Shu nuqtai nazardan qaraganda, Tayvan muammosi nafaqat hududiy nizolar doirasidagi masala, balki XXI asr xalqaro munosabatlar tizimida global kuchlar muvozanati, xavfsizlik arxitekturasini va geosiyosiy manfaatlar to‘qnashuvining muhim elementi sifatida namoyon bo‘lmoqda. Ayniqsa, AQSh va Xitoy o‘rtasidagi iqtisodiy, texnologik hamda harbiy raqobatning kuchayib borishi Tayvan masalasining strategik ahamiyatini yanada oshirmoqda. Tayvan bo‘g‘ozi mintaqasida yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan har qanday keskinlik nafaqat Sharqiy Osiyo xavfsizligiga, balki butun xalqaro iqtisodiy tizim va global siyosiy barqarorlikka ham bevosita ta‘sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli xalqaro hamjamiyat Tayvan masalasini ehtiyotkorlik bilan kuzatib borayotgan bo‘lib, muammoni diplomatik vositalar orqali hal etish bugungi kunning eng dolzarb geosiyosiy vazifalaridan biri sifatida baholanmoqda.

Foydalanilgan adabiyotlar

On China / Kissinger H. On China. — New York: Penguin Press, 2011.

The Generalissimo: Chiang Kai-shek and the Struggle for Modern China / Taylor J. The Generalissimo: Chiang Kai-shek and the Struggle for Modern China. — Harvard University Press, 2009.

Fairbank J., Goldman M. China: A New History. — Cambridge: Harvard University Press, 2006.

Fenby J. Modern China: The Fall and Rise of a Great Power. — New York: HarperCollins, 2008.

The Cold War: A New History / Gaddis J. L. The Cold War: A New History. — New York: Penguin Press, 2005.

Bush R. Untying the Knot: Making Peace in the Taiwan Strait. — Washington: Brookings Institution Press, 2005.

Copper J. Taiwan: Nation-State or Province? — Boulder: Westview Press, 2013.

Nathan A., Scobell A. China’s Search for Security. — Columbia University Press, 2012.

Sutter R. Chinese Foreign Relations: Power and Policy since the Cold War. — Rowman & Littlefield Publishers, 2016.

United Nations. UN General Assembly Resolution 2758 (1971).

Shanghai Communiqué, 1972.

Taiwan Relations Act, United States Congress, 1979.

Yahuda M. The International Politics of the Asia-Pacific. — Routledge, 2019.

Huntington S. The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order. — New York: Simon & Schuster, 1996.

Brzezinski Z. The Grand Chessboard: American Primacy and Its Geostrategic Imperatives. — Basic Books, 1997.

THE ROLE OF WEATHER DERIVATIVES IN MANAGING ENERGY MARKET RISKS: EVIDENCE FROM THE U.S. ENERGY SECTOR

Muxlisa Qambarova¹, Gulnora Mirvalievna Raimova²

¹ Undergraduate Student, Faculty of International Economics and Management, University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

² Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: Climate change and increasing weather volatility have intensified weather-related risks in global energy markets. Since energy consumption strongly depends on temperature fluctuations and seasonal weather conditions, energy companies face significant uncertainty in demand and revenue stability. In this context, weather derivatives have become an important financial instrument for hedging weather-related risks. This study examines the role of weather derivatives in managing energy-market risks using the example of the U.S. energy sector. The research is based on monthly panel data from 46 U.S. states covering the period 2021–2024. A weather risk model was developed to measure deviations in energy consumption, while clustering analysis was applied to classify states according to climatic characteristics and weather sensitivity. The empirical analysis employs a fixed-effects panel regression model using HTDD, CLDD, DT32, and precipitation indicators. The results reveal significant regional and seasonal asymmetry in weather-related energy risks. Natural gas risk is higher in cold-climate states, whereas electricity risk is more pronounced in hot-climate regions. The findings confirm that HTDD and CLDD indices have statistically significant effects on energy-consumption volatility. The study concludes that weather derivatives can serve as an effective mechanism for stabilizing revenues and improving financial risk management in energy companies.

Keywords: weather derivatives, energy market, weather risk, HTDD, CLDD, clustering analysis, panel regression.

Introduction: Climate change and increasing weather instability are creating serious challenges for the global energy sector. Energy consumption patterns strongly depend on weather conditions, particularly temperature fluctuations during summer and winter seasons. Extremely cold periods increase demand for heating and natural gas, while hot weather leads to higher electricity consumption caused by cooling systems and air conditioning. These fluctuations generate substantial uncertainty for energy companies and negatively affect revenue stability.

Traditional risk-management instruments, such as insurance mechanisms, are often insufficient for managing weather-related financial risks because such risks are not always associated with physical damage. As a result, weather derivatives have emerged as innovative financial instruments specifically designed to hedge risks caused by abnormal weather conditions. According to Jewson and Brix (2005), weather derivatives were initially developed in the U.S. energy market as instruments for managing volumetric risk associated with temperature fluctuations. Similarly, Benth and Benth (2013) emphasize that HDD and CDD contracts are among the most effective instruments for stabilizing seasonal energy-demand volatility.

The United States currently has one of the most developed weather-derivatives markets, particularly in the energy sector, where utility companies actively use HDD and CDD contracts to hedge

weather-related demand fluctuations. Cao and Wei (2004) argue that temperature variability significantly affects energy-consumption behavior and increases financial uncertainty for utility companies. Therefore, the U.S. energy market provides an appropriate empirical framework for analyzing weather-related risks and the effectiveness of weather derivatives.

Despite the growing importance of weather risk management worldwide, the application of weather derivatives in developing economies remains limited. In Uzbekistan, the sharply continental climate causes substantial seasonal fluctuations in both electricity and natural gas demand. However, weather derivatives and related financial hedging mechanisms remain largely underdeveloped within the national energy and financial systems.

This study aims to evaluate the role of weather derivatives in energy risk management using the example of the U.S. energy sector and to assess the potential applicability of such instruments in Uzbekistan. The research develops a weather risk model based on energy-consumption deviations and applies clustering analysis to classify U.S. states according to climatic characteristics and weather sensitivity.

Literature Review: Weather derivatives are financial contracts whose payouts depend on weather-related indices such as temperature, precipitation, snowfall, or wind speed. Unlike traditional insurance products, weather derivatives do not require proof of physical damage. Instead, they compensate companies for financial losses caused by deviations in weather conditions from expected levels.

The modern weather-derivatives market emerged in the late 1990s in the United States after the deregulation of energy markets. According to Dischel (2002), energy companies became the first major participants in weather-derivatives markets because abnormal weather conditions directly affected electricity and natural gas demand. HDD and CDD contracts rapidly became the dominant weather derivatives used by utility companies.

Several studies have confirmed the strong relationship between temperature fluctuations and energy demand. Alexandridis and Zapanis (2013) note that weather conditions significantly influence seasonal energy-consumption patterns and increase market volatility. Similarly, Cao and Wei (2004) demonstrate that temperature-related uncertainty affects financial performance and revenue stability in energy companies.

Previous empirical studies have widely applied econometric methods to analyze weather sensitivity in energy markets. Fixed-effects panel regression models are frequently used because they allow researchers to control for regional heterogeneity and unobserved state-specific factors. In addition, clustering techniques have become increasingly popular for identifying regional climate patterns and differences in energy-demand behavior.

However, limited attention has been devoted to combining clustering analysis and panel fixed-effects models within a single framework for measuring weather-related energy risks. Therefore, this study contributes to the literature by developing an integrated approach that combines weather-risk modeling, clustering analysis, and panel regression estimation.

Main Analysis: The empirical analysis is based on monthly panel data collected from 46 U.S. states during the period 2021–2024, comprising 2,208 observations. The dataset combines meteorological indicators obtained from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) with energy-consumption statistics from the U.S. Energy Information Administration (EIA).

The study includes several weather indicators that characterize climatic conditions across states. HTDD (Heating Degree Days) measures heating demand during cold weather periods, while CLDD (Cooling Degree Days) reflects cooling demand during hot periods. DT32 represents the number of days with temperatures below 32°F (0°C), indicating extreme cold conditions. PRCP measures precipitation levels in millimeters.

Energy-consumption data include monthly natural gas consumption measured in MMcf and electricity consumption measured in MWh. Since energy-consumption levels differ significantly across states, logarithmic transformation was applied to improve comparability and reduce the influence of extreme values.

To quantify weather-related energy risks, a special empirical model was developed using monthly panel data from 46 U.S. states covering the period 2021–2024, with a total of 2,208 observations. Since energy-consumption levels differ substantially across states, weather risk was measured as the absolute deviation of the logarithm of energy consumption from the state-specific average level. The logarithmic transformation reduces the influence of extreme values and improves comparability across states with different consumption scales. The weather risk model is specified as follows:

$$\text{Risk}_{it} = |\ln(E_{it}) - \ln(\bar{E}_i)|$$

Where Risk_{it} represents weather risk in state i during period t , E_{it} denotes energy consumption, and $\ln(\bar{E}_i)$ is the logarithm of average energy consumption in state i . Separate risk indicators were calculated for natural gas and electricity consumption.

The empirical model includes four major weather indicators aggregated at the state level using NOAA meteorological data. HTDD (Heating Degree Days) measures heating demand during cold weather periods and serves as the primary driver of natural gas consumption during winter months. CLDD (Cooling Degree Days) reflects cooling demand during hot periods and is associated with increased electricity consumption during summer seasons. DT32 represents the number of days with temperatures below 32°F (0°C), capturing extreme cold conditions and freezing risks, while PRCP measures total precipitation levels.

To estimate the quantitative relationship between weather conditions and energy risks, the study applies a fixed-effects panel regression model specified as follows:

$$\text{Risk}_{it} = \alpha_i + \beta_1 \text{HTDD}_{it} + \beta_2 \text{CLDD}_{it} + \beta_3 \text{DT32}_{it} + \beta_4 \text{PRCP}_{it} + \varepsilon_{it}$$

In this specification, α_i represents state-specific fixed effects capturing unobserved heterogeneity such as economic structure, climate type, and consumption behavior. The coefficients β_1 – β_4 measure the marginal effects of weather indicators on energy risk, while ε_{it} denotes the error term. Clustered robust standard errors based on the Arellano method were employed in order to account for heteroskedasticity and serial correlation. The final model specification was validated using Breusch–Pagan, F-test, and Hausman tests.

The empirical results reveal strong seasonality in weather-related energy risks. Natural gas risk reaches its highest levels during January and February, when heating demand significantly increases, while electricity risk peaks during July and August due to intensive cooling demand. The results also show that extreme weather events substantially increase energy-market volatility. During the 2022 Texas “Uri” winter storm, natural gas risk reached exceptionally high levels, demonstrating the vulnerability of energy systems to abnormal weather conditions.

The findings indicate that weather-related demand fluctuations create significant financial uncertainty for energy companies operating in highly climate-sensitive regions. Seasonal volatility in energy consumption also affects market prices, supply stability, and operational planning within the energy sector. In particular, cold-weather anomalies generate sharp increases in natural gas demand, leading to higher exposure to supply shortages and price spikes. Similarly, prolonged heatwaves intensify electricity consumption due to increased air-conditioning usage, placing additional pressure on electricity grids. These results confirm the growing importance of weather derivatives as instruments for stabilizing revenues and reducing the financial impact of abnormal weather conditions in energy markets.

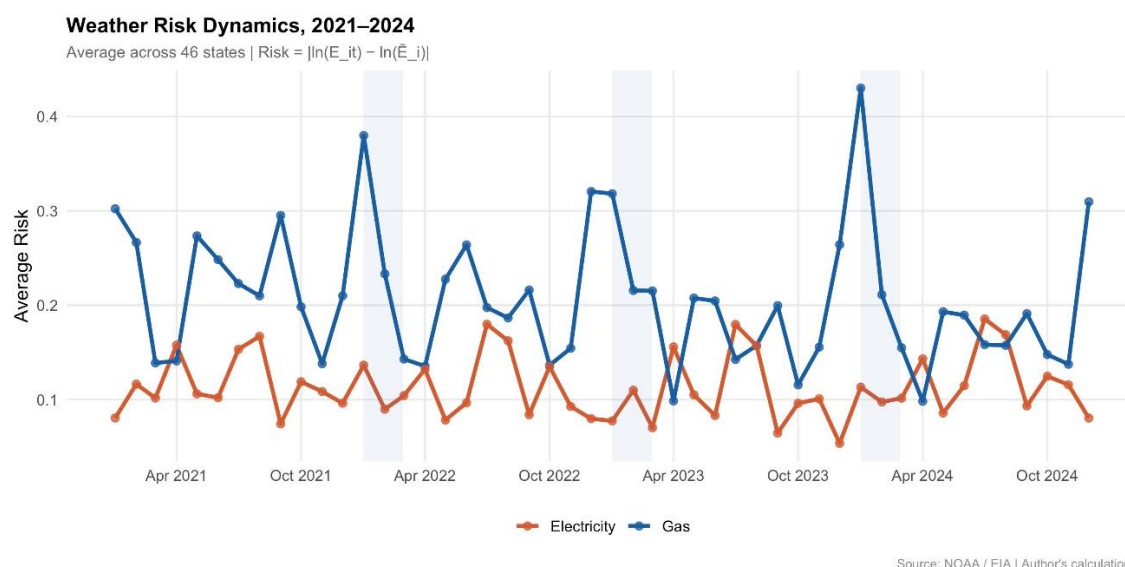


Figure 1. Monthly dynamics of average weather risk across 46 U.S. states (2021–2024).

Source: developed by the author using NOAA and EIA data. Unless otherwise stated, all subsequent figures are based on the same dataset.

Seasonal risk profiles further confirm the asymmetric nature of energy-market risks. Average natural gas risk reaches approximately 0.198 during winter periods but declines to around 0.108 during summer months. In contrast, electricity risk becomes highest during summer periods, reaching approximately 0.061, while remaining lower during winter seasons at around 0.038. This asymmetry demonstrates that weather risks affect natural gas and electricity markets differently and explains why HDD and CDD derivatives complement each other throughout the year. The results suggest that energy companies are exposed to different types of weather-related financial risks depending on the season and the dominant source of energy demand. Winter periods primarily increase exposure to heating-related gas-consumption volatility, whereas summer periods intensify electricity-demand uncertainty associated with cooling activities.

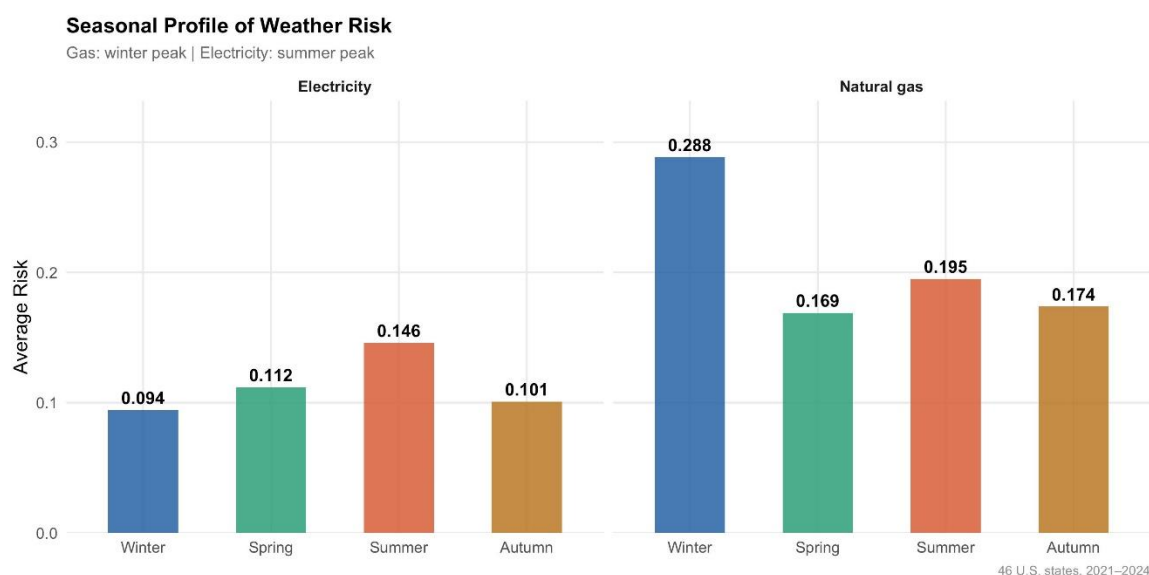


Figure 2. Average weather risk by season for natural gas and electricity markets.

In addition to regression analysis, clustering techniques were used to classify U.S. states according to climatic characteristics. Based on HTDD values, states were grouped into three climate categories: cold-climate states, moderate-climate states, and hot-climate states. Cold regions such as

Alaska and Minnesota demonstrated substantially higher natural gas risk levels than hot-climate states such as Texas and Florida. Average gas risk in cold states was estimated at 0.283, compared to only 0.119 in hot states, indicating a difference of approximately 2.4 times.

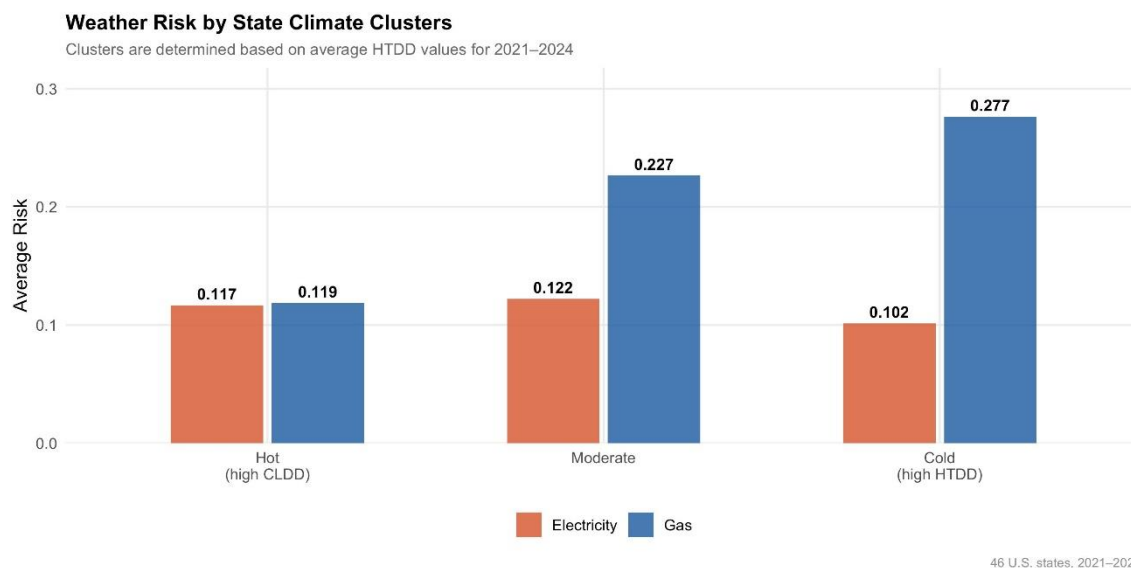


Figure 3. Average weather risk across climate clusters.

Scatterplot analysis also demonstrated statistically significant positive relationships between weather indices and energy risks. Higher HTDD values were associated with increasing natural gas risk, whereas higher CLDD values corresponded to greater electricity risk. Although the relationships appeared generally linear, the relatively high dispersion in the data reflected substantial heterogeneity across states and justified the use of fixed-effects panel estimation.

The final regression results quantitatively confirmed the influence of weather conditions on energy-market risks. In the natural gas model, HTDD coefficients were statistically significant at the 1% level, while CLDD coefficients remained statistically insignificant, confirming that natural gas consumption is primarily driven by heating demand. In the electricity-risk model, both HTDD and CLDD variables were statistically significant, indicating that electricity markets are simultaneously exposed to both cold and hot weather risks. The estimated within R^2 value of approximately 6% suggests that weather conditions explain a meaningful share of energy-demand volatility, although weather derivatives should be considered part of a broader risk-management framework rather than a standalone solution.

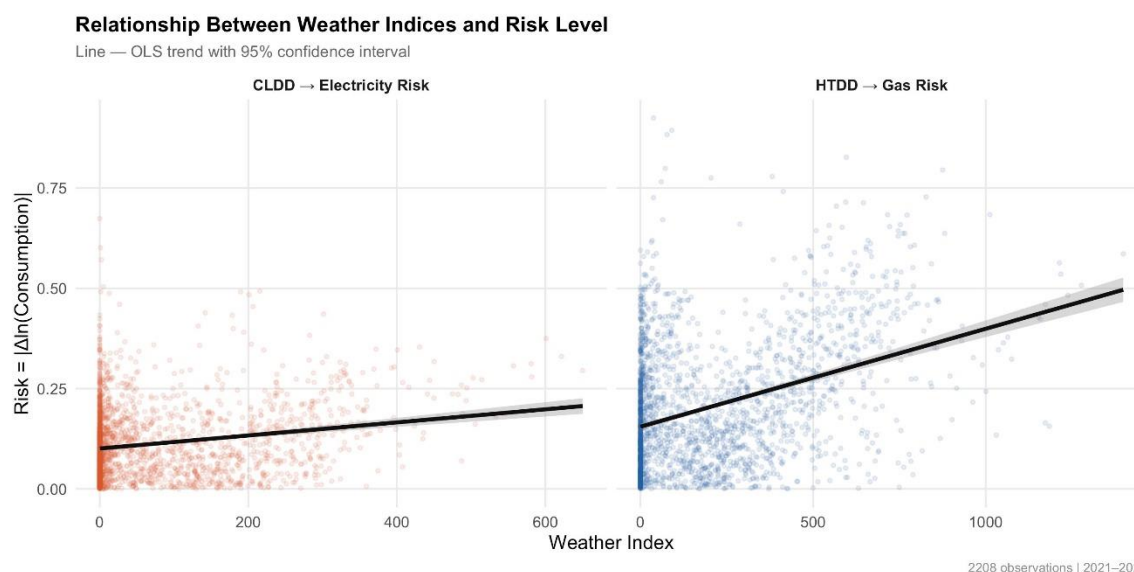


Figure 4. Relationship between HTDD/CLDD and weather risk.

Note: Each point represents a state-month observation. The fitted line shows the OLS trend with a 95% confidence interval.

Policy Implications: The findings of this study have important implications for both energy companies and policymakers. First, the significant regional differences in weather sensitivity indicate the necessity of region-specific hedging strategies. Energy companies operating in cold-climate regions should focus primarily on HDD-based instruments, whereas companies in hot regions may benefit more from CDD-based contracts.

Second, the results demonstrate the importance of integrating weather derivatives into comprehensive risk-management systems. Since weather conditions substantially influence energy-demand volatility, weather derivatives can help stabilize revenues and reduce financial uncertainty.

For emerging economies such as Uzbekistan, the development of weather-derivatives markets may contribute to improving energy-market stability and strengthening financial risk management. However, successful implementation requires reliable meteorological databases, institutional support, and the development of financial-market infrastructure.

Conclusion: This study examined the role of weather derivatives in managing energy-market risks using the example of the U.S. energy sector. The empirical analysis confirmed that weather conditions significantly affect both electricity and natural gas consumption patterns, creating substantial seasonal and regional risk asymmetries.

The clustering analysis demonstrated that natural gas risk is considerably higher in cold-climate states, whereas electricity risk is more pronounced in hot regions. Panel regression results confirmed the statistical significance of HTDD and CLDD indices in explaining energy-risk volatility.

The findings suggest that weather derivatives can serve as effective instruments for stabilizing revenues and improving financial risk management in energy companies. Furthermore, the study highlights the importance of region-specific hedging strategies and discusses the potential applicability of weather derivatives in emerging energy markets such as Uzbekistan.

References

1. Alexandridis, A., & Zaprani, A. (2013). *Weather Derivatives and Weather Risk Management*. Springer.
https://www.researchgate.net/publication/302208574_The_Weather_Derivatives_Market
2. Benth, F. E., & Benth, J. Š. (2013). *Modeling and Pricing in Financial Markets for Weather Derivatives*. World Scientific.
https://www.researchgate.net/publication/379218854_Modeling_and_Pricing_in_Financial_Markets_for_Weather_Derivatives
3. Cao, M., & Wei, J. (2004). Weather derivatives valuation and market price of weather risk. *Journal of Futures Markets*, 24(11), 1065–1089.
https://www.yorku.ca/mcao/cao_wei_weather_JFM
4. Dischel, R. (2002). *Climate Risk and the Weather Market*. Risk Books.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Climate-Risk-and-the-Weather-Market%3A-Financial-Risk-Dischel/f8cd52bc445c7ff845f3119b80b8d4b5023c533b>
5. Jewson, S., & Brix, A. (2005). *Weather Derivative Valuation*. Cambridge University Press.
https://www.researchgate.net/publication/286487766_Weather_Derivative_Valuation_The_Meteorological_Statistical_Financial_and_Mathematical_Foundations

6. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Climate Data Online Database. <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/>
7. U.S. Energy Information Administration (EIA). State Energy Data System. <https://www.eia.gov/state/seds/>
8. CME Group. Weather Products and Degree Day Indexes. <https://www.cmegroup.com/trading/weather/temperature-based-indexes.html>
9. J. (2018). *Options, Futures, and Other Derivatives*. Pearson. http://lib.ysu.am/disciplines_bk/2b66030e0dd4c77b2bda437f6c1e5e66.pdf
10. World Bank Climate Change Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

[DOI 10.5281/zenodo.20236781](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236781)

QUANTUM INTERFERENCE AND SEMANTIC VECTORS: ADDRESSING CONTEXT PRESERVATION IN AI-POWERED MACHINE TRANSLATION SYSTEMS

Makhmudjanova Sayyora Yashin qizi

University of World Economy and Diplomacy

Abstract

Machine translation (MT) systems based on transformer architectures have achieved remarkable fluency, yet they continue to struggle with long-range context preservation and semantic ambiguity across discourse boundaries. This paper investigates the application of quantum-inspired semantic models — specifically quantum interference mechanisms and semantic vector spaces — as a theoretical and computational framework for addressing these limitations. We analyze the core challenges in context retention within current neural MT pipelines, propose a quantum-semantic hybrid framework, and discuss its potential to improve disambiguation and coherence in AI-driven translation. Our analysis suggests that quantum interference models offer a principled approach to representing superposed word meanings, enabling more accurate context-sensitive decoding in multilingual settings.

Keywords: machine translation, quantum semantics, semantic vectors, quantum interference, context preservation, natural language processing, artificial intelligence

Introduction

The rapid advancement of neural machine translation (NMT) systems, from sequence-to-sequence models to large-scale transformer architectures such as GPT and mBART, has dramatically improved translation quality across dozens of language pairs. Despite these gains, a persistent challenge remains: the faithful preservation of semantic context across sentence and paragraph boundaries. When translating extended discourse, MT systems frequently fail to maintain referential consistency, pragmatic intent, and domain-specific terminology — particularly in low-resource language settings.

Quantum cognition and quantum-inspired natural language processing (NLP) have emerged as novel paradigms that leverage the mathematical formalism of quantum mechanics — superposition,

entanglement, and interference — to model cognitive phenomena such as ambiguity, context dependency, and conceptual combination. Unlike classical probabilistic models, quantum models represent word meanings as vectors in Hilbert space, allowing them to exist in superposed states until contextually resolved.

This paper focuses specifically on quantum interference as a mechanism for semantic vector composition, and its application to context preservation problems in MT. We argue that interference-based models can represent competing semantic interpretations simultaneously, and that this property is well-suited to the disambiguation tasks that standard neural decoders currently handle suboptimally.

Neural Machine Translation. Modern NMT systems rely primarily on the transformer architecture (Vaswani et al., 2017), which employs self-attention mechanisms to model dependencies between input tokens. Pre-trained multilingual models such as mBERT (Devlin et al., 2019) and mBART (Liu et al., 2020) have further extended translation capabilities through cross-lingual transfer learning. Attention mechanisms allow models to dynamically weight source tokens when generating each target token. However, the attention window is fundamentally local and does not maintain explicit discourse-level representations across document segments.

Quantum-Inspired NLP. Quantum cognition (Busemeyer & Bruza, 2012) provides a mathematical framework for modeling human judgment and decision-making using quantum probability theory. Applied to language, this framework represents words and concepts as density matrices or state vectors in complex Hilbert spaces (van Rijsbergen, 2004). Quantum interference has been shown to capture non-classical co-occurrence patterns between words that classical vector space models fail to represent (Aerts, 2014). The interference term accounts for the way in which the presence of one semantic feature can constructively or destructively affect the probability of another, providing a richer model of contextual meaning modulation.

Problem Analysis: Context Preservation in MT

A central failure mode of current NMT systems is semantic drift: the gradual deviation from an established semantic frame as translation proceeds through a document. In technical or legal texts, a term introduced with a specific domain meaning in paragraph 1 may be rendered inconsistently in later paragraphs, because the sentence-level model lacks a persistent representation of the established meaning.

Polysemy — the phenomenon whereby a single word form carries multiple distinct meanings — poses a fundamental disambiguation challenge. Classical MT systems resolve polysemy through contextual embeddings, which assign a single vector representation to each word in context. This approach collapses the superposed meaning state of a polysemous word prematurely, before all disambiguating contextual evidence has been processed. As illustrated in Figure 1, the correct approach is to maintain the word's meaning in superposition until sufficient evidence allows contextual resolution.

Beyond individual word semantics, discourse coherence requires that entities, events, and relations introduced at one point in a text be consistently tracked throughout. Coreference resolution — identifying that two expressions refer to the same entity — is a task that current NMT systems handle implicitly and unreliably, particularly when source and target languages differ in their grammatical expression of reference.

Figure 1: Polysemy as quantum superposition

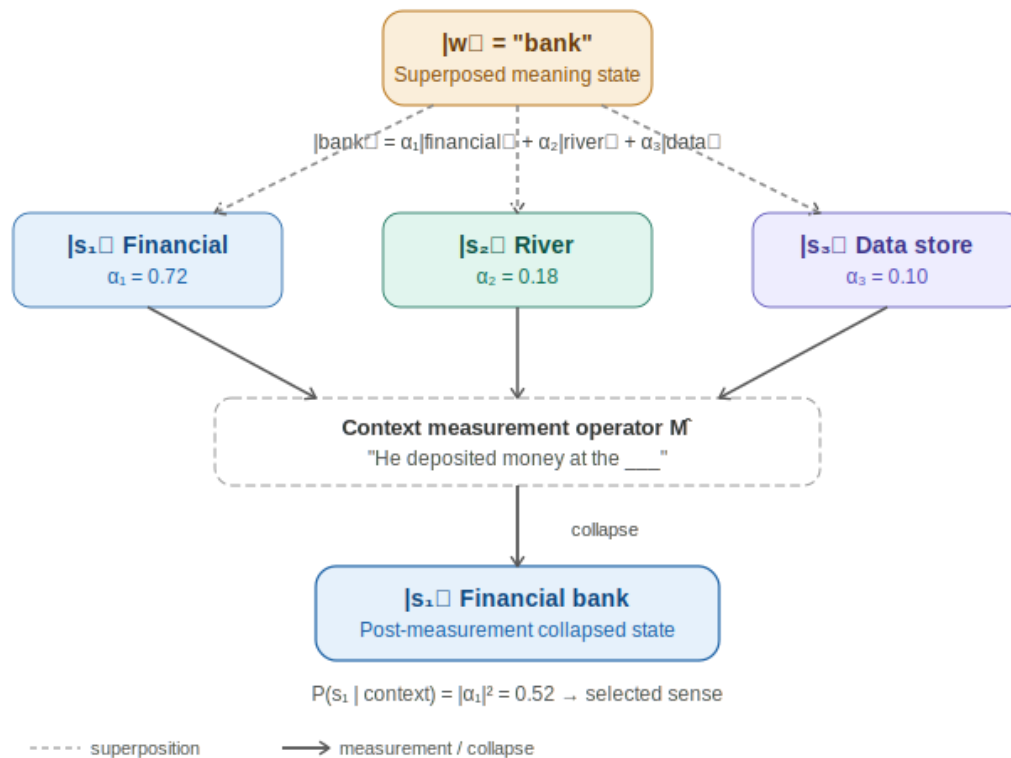


Figure 1. A polysemous word w represented as a quantum superposition of senses s_1, s_2, s_3

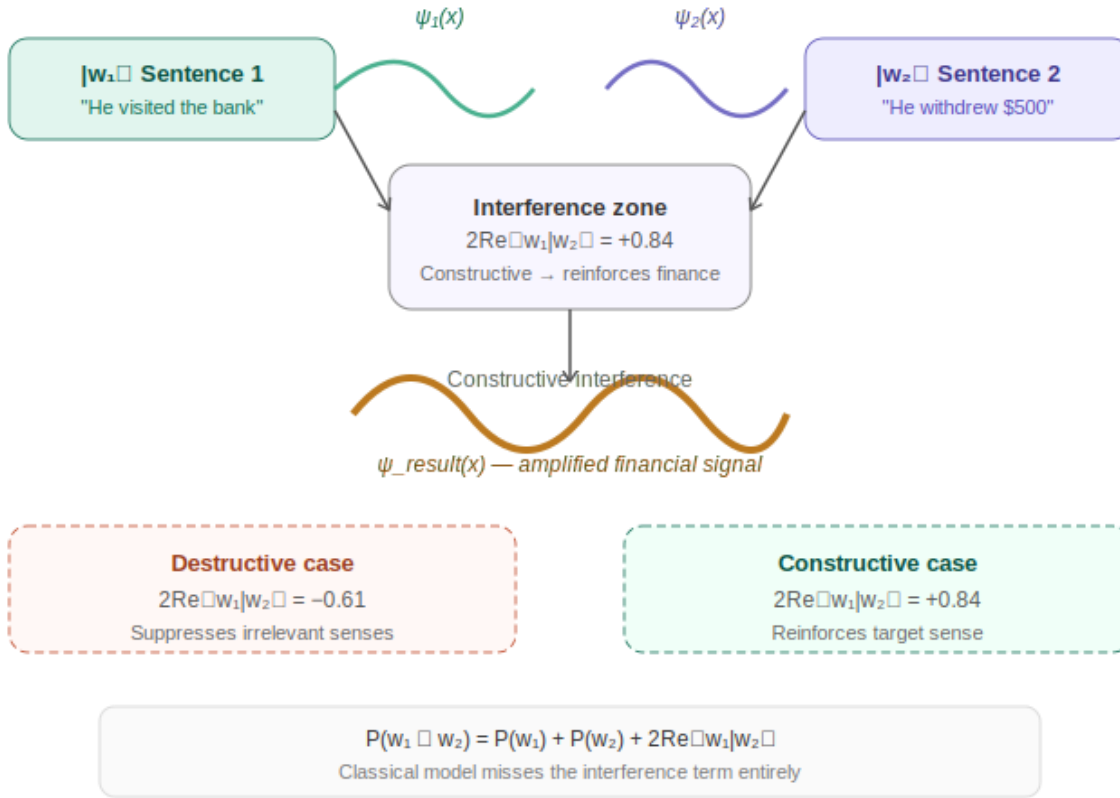
Proposed Framework: Quantum-Semantic MT

We propose representing word meanings as pure state vectors $|w\rangle$ in a complex Hilbert space H , where each basis dimension corresponds to a latent semantic feature. A polysemous word with n possible senses is represented as a superposition $w = \alpha_1|s_1\rangle + \alpha_2|s_2\rangle + \dots + \alpha_n|s_n\rangle$, where $|\alpha_i|^2$ reflects the prior probability of sense s_i . Contextual evidence is modeled as a measurement operator that projects this superposition onto the most contextually consistent sense.

Interference-Based Semantic Composition

The key innovation of our framework is the use of quantum interference to model semantic vector composition across discourse segments. When two semantic vectors $|w_1\rangle$ and $|w_2\rangle$ interact, their composite representation includes an interference term: $P(w_1 \wedge w_2) = P(w_1) + P(w_2) + 2\text{Re}(\langle w_1|w_2\rangle)$. Figure 2 illustrates how this cross-term can either reinforce (constructive interference) or suppress (destructive interference) specific meaning components, enabling principled delayed disambiguation across sentence boundaries.

Figure 2: Quantum interference for semantic composition

Figure 2. Quantum interference between semantic vectors w_1 and w_2

As shown in Figure 3, we envision integrating quantum semantic layers into existing transformer-based MT architectures in two ways. First, as a discourse-level memory module: a quantum state register maintaining a density matrix $\hat{\rho}$ of the accumulated discourse context, updated sentence by sentence. This register is queried during decoding to bias the target vocabulary distribution toward contextually consistent translations. Second, as a quantum reranking component: given a beam of candidate translations, interference scores are computed between each candidate and the discourse state vector for reranking.

Figure 3: Quantum-semantic MT pipeline

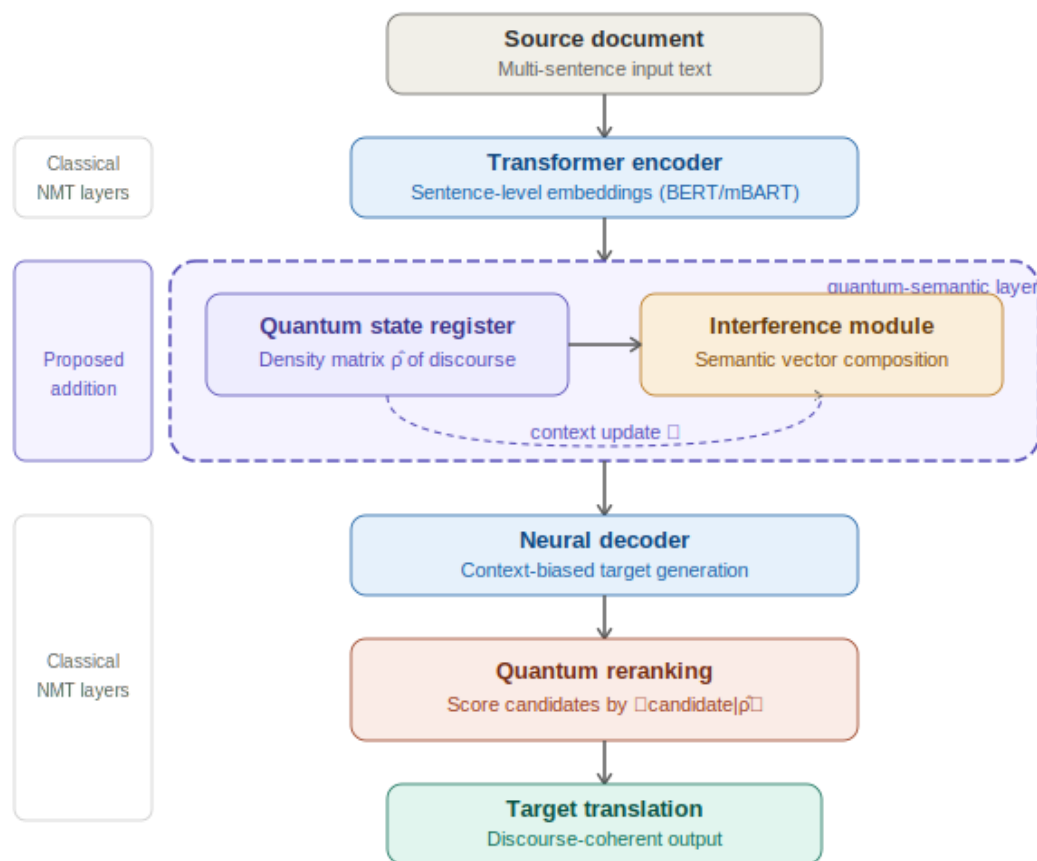


Figure 3. Proposed quantum-semantic MT pipeline.

Potential Advantages

The proposed framework offers several theoretical advantages. By maintaining superposed meaning representations, it avoids premature disambiguation — a key source of translation errors in polysemous contexts. The interference mechanism provides a mathematically principled way to integrate evidence across discourse. Furthermore, density matrix representations naturally handle uncertainty and vagueness in meaning, particularly relevant for translating pragmatically complex expressions.

Several significant challenges must be addressed. First, the dimensionality of the Hilbert space required to represent rich semantic content raises scalability concerns; efficient approximation methods will be necessary. Second, mapping from learned transformer embeddings to quantum state representations requires principled methods not yet fully established. Third, standard MT metrics such as BLEU do not capture discourse-level coherence, necessitating new evaluation protocols. It should also be noted that the use of quantum formalism here is primarily mathematical and cognitive: we do not assume actual quantum hardware is required, as quantum-inspired algorithms on classical hardware have already demonstrated feasibility in related NLP tasks (Zhang et al., 2021).

Future work should focus on: (1) empirical evaluation of quantum interference reranking on standard document-level MT benchmarks; (2) development of hybrid quantum-classical training procedures; (3) exploration of quantum entanglement as a model for coreference and cross-sentence

entity tracking; and (4) extension to low-resource language pairs where contextual disambiguation is especially challenging.

Conclusion. This paper has argued that quantum interference and semantic vector representations offer a theoretically grounded and practically promising approach to the longstanding problem of context preservation in machine translation. Classical NMT systems suffer from premature semantic disambiguation and the absence of explicit discourse-level memory. Quantum-inspired models, by maintaining superposed meaning states and employing interference-based composition, provide mechanisms naturally suited to the demands of discourse-coherent translation. We hope this paper stimulates further empirical and theoretical investigation into quantum-semantic approaches to language understanding and translation.

References

1. Aerts, D. (2014). Quantum theory and human cognition. *Topics in Cognitive Science*, 6(1), 7–19.
2. Blacoe, W., Kashefi, E., & Lapata, M. (2013). A quantum-theoretic approach to distributional semantics. *Proceedings of NAACL-HLT 2013*, 847–857.
3. Busemeyer, J. R., & Bruza, P. D. (2012). *Quantum Models of Cognition and Decision*. Cambridge University Press.
4. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of NAACL-HLT 2019*, 4171–4186.
5. Kang, X., Feng, Y., Zhao, D., & Bian, J. (2020). Dynamic context selection for document-level neural machine translation via reinforcement learning. *Proceedings of EMNLP 2020*.

[DOI 10.5281/zenodo.20236724](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236724)

ROSSIYA TASHQI SIYOSATIDA “YUMSHOQ KUCH” OMILI: NORMATIV-HUQUQIY VA DISKURSIV TAHLIL

Bekchanov Sultanbay Alisher o'g'li, Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti Talabalarini qabul qilish va rasmiylashtirish ofisi bosh mutaxassisi, Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti huzuridagi Diplomatik Akademiyaga magistranti.

100007, O'zbekiston, Toshkent, Mustaqillik shoh ko'chasi, 54.

e-mail: bekchanovsultonboy@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5808-4645

Annotatsiya. Maqola Rossiya normativ-huquqiy hujjatlarida “yumshoq kuch” atamasining o'zgarish dinamikasi diskursiv tahlil qilingan. Muallif Rossiya huquqiy maydonida mazkur atamani tahlil qilishda, asosan, tashqi siyosat konsepsiyalari va Prezident qarorlariga tayanadi. U yumshoq kuch atamasi G'arbcha standartlardan milliy qadriyatlarga tayanuvchi gumanitar siyosatga o'zgarganligi haqida xulosaga keladi hamda post-sovet makonidagi davlatlar hamda O'zbekiston uchun amaliy tavsiyalar beradi.

Tadqiqot metodologiyasi Rossiya tashqi siyosat konsepsiyalari va Prezidentining qarorlarini diskursiv tahlil qilishga asoslanadi. Bu esa xalqaro maydonda Rossiya davlatchiligi o'ziga xosligini shakllantiruvchi leksik va ma'naviy konstruktarning 1993-yildan hozirgacha qanday o'zgarganini tushunishga yordam beradi.

Kalit so'zlar: Yumshoq kuch, Rossiya, madaniyat, qadriyat, gumanitar siyosat, tashqi siyosat konsepsiyasi, sivilizatsion istisnollik, Rus dunyosi, Rossotrudnichestvo.

Аннотация. В статье проводится дискурсивный анализ динамики изменений термина «мягкая сила» в российском законодательстве. Автор опирается в своем анализе данного термина в российском правовом поле в основном на внешнеполитические концепции и указы Президента. Он приходит к выводу, что термин «мягкая сила» изменился с западных стандартов на гуманитарную политику, основанную на национальных ценностях, и дает практические рекомендации для стран постсоветского пространства и Узбекистана.

Методология исследования основана на дискурсивном анализе концепций внешней политики России и решений Президента. Это помогает понять, как изменились лексические и семантические конструкции, формирующие идентичность российской государственности на международной арене с 1993 года по настоящее время.

Ключевые слова: мягкая сила, Россия, культура, ценности, гуманитарная политика, внешнеполитическая концепция, цивилизационная исключительность, Русский мир, Россотрудничество.

Abstract. This article presents a discursive analysis of the evolution of the term “soft power” in Russian legislation. In his analysis of this term within the Russian legal framework, the author relies primarily on foreign policy concepts and presidential decrees. He concludes that the term “soft power” has shifted from Western standards to a humanitarian policy based on national values, and offers practical recommendations for the post-Soviet space and Uzbekistan.

The research methodology is based on a discursive analysis of Russian foreign policy concepts and presidential decrees. This helps to understand how the lexical and semantic constructs shaping the identity of Russian statehood on the international stage have changed from 1993 to the present.

Key words: soft power, Russia, culture, values, humanitarian policy, foreign policy concept, civilizational exceptionalism, Russian World, Rossotrudnichestvo.

2022-yil 24-fevralda Rossiya Ukraina hududiga bostirib kirishi xalqaro huquq tizimida inqirozlar boshlanganining ilk belgisi edi. 2023-yil 7-oktabrda Isroil va Hamas o'rtasida boshlangan urush va 2026-yil yanvardagi Donald Trampning Venesualadagi “maxsus operatsiyasi” hamda 28-fevralda boshlangan Eronga nisbatan “adolatsiz urush” bu inqirozni yanada tezlashtirdi. Bu siyosiy hodisalar xalqaro maydonda 1991-yildan beri ilk bor “qattiq kuch” (hard power)ning yana dolzarb tus olganini ko'rsatadi. Biroq shunday bo'lsa-da, bu holat dunyo aholisining “ongi va qalbi” uchun ketayotgan global raqobatning ahamiyatini zarracha kamaytirmadi. Zero, amerikalik siyosatshunos Jozef S. Nay ta'kidlaganidek, global kommunikatsiyalar asrida “kimning tarixi ishonchli bo'lsa, o'sha g'alaba qozonadi”.¹⁶

“Yumshoq kuch” (Soft power) tushunchasi J. Nay tomonidan 1990-yilda “Yetakchilikka mahkum: Amerika qudratining o'zgaruvchan tabiati” nomli asarida ilk marotaba tilga olingan bo'lib, davlatning istalgan natijaga majburlash yoki to'lov bilan emas, balki jozibadorlik va ishonitirish orqali erishish qobiliyatini anglatadi. J.Nay bu ta'sirning asosiy resurslari sifatida madaniyat, siyosiy qadriyatlar va legitim tashqi siyosatni ko'radi.¹⁷ “Yumshoq kuchning liberal paradigmada amalga oshirishining muhim sharti maqsadli auditoriyaning targ'ib qilinayotgan qadriyat va obrazlarni ko'ngilli ravishda qabul qilishlariga bog'liq.”¹⁸

Mazkur tushuncha Rossiyadagi huquqiy va siyosiy maydonda boshqacha talqinga ega. Bunda “yumshoq kuch”ning liberal paradigmadan davlat markazchiligiga o'tganini ko'rishimiz mumkin. Agar J.Nayda bu konsepsiyaning asosiy vositalari fuqarolik jamiyati (universitetlar, fondlar) bo'lsa, Rossiyada davlat tomonidan boshqariladigan “tashqi siyosiy vazifalarini hal

¹⁶ Nye J.S. Soft Power: The means to success in world politics. - NY.: Public Affairs, 2004. p. 106.

¹⁷ Nye J.S. Soft Power: The means to success in world politics. - NY.: Public Affairs, 2004. p. 11.

¹⁸ Nye, J. S. Soft power: the evolution of a concept. // Journal of Political Power, 14(1)., 2021. p. 8.

qiluvchi kompleks vositalar” sifatida qabul qilinadi.¹⁹ Rossiyada yumshoq kuchga yondashuvning o‘ziga xosligi uning kuch ishlatmasdan ta’sir ko‘rsatishni milliy xavfsizlik prizmasi orqali qabul qilishi va suverenitetni boshqa davlatlarning shunday ta’siridan “destruktiv foydalanishi”dan himoyalash bilan izohlanadi.²⁰

Ushbu maqolaning maqsadi Rossiya huquqiy maydonida yumshoq kuch tushunchasining o‘zgarish dinamikasini o‘rganish va davlatchilik qurilishida uning hozirgi rolini aniqlashdan iborat. Chunki dunyo tartiboti o‘zgarayotgan, xalqaro sanksiyalar kuchaygan va xorijda mamlakatning qadriyat va sivilizatsiyalarga asoslangan o‘ziga xosligini institutsional jihatdan mustahkamlash zarurati tug‘ilgan bir sharoitda Rossiya milliy manfaatlarini amalga oshirishda “yumshoq kuch”ning oshib borayotgan roli mazkur mavzuni yanada dolzarb qiladi.

Tashqi siyosat konsepsiyasidagi yumshoq kuch ritorikasi evolyutsiyasi (1993-2023-yillar)

Rossiya Federatsiyasida 1993-yildan 2023-yilgacha 6 ta tashqi siyosat konsepsiyasi qabul qilingan. Tashqi siyosiy konsepsiyalarni tahlil qilish yillar davomida siyosiy ritorikaning passiv “gumanitar aloqalar”dan “sivilizatsion istisnolik”ning tasdiqlanishigacha bo‘lgan o‘zgarishlarning bir qancha bosqichlarini bosib o‘tganini ko‘rsatadi.

Birinchi bosqich 1993-2000-yillarni o‘z ichiga olib, bu bosqichda Rossiya tashqi siyosati post-bipolyar davridagi sharoitlarga moslashish va o‘zini himoya qilishga qaratilgandi. 1993-yilgi konsepsiyada urg‘u asosan “Rossiya Federatsiyasining dunyo hamjamiyatiga tabiiy ravishda qo‘shilishi” va “intellektual va axloqiy potentsiali”dan foydalanishiga qaratilgan.²¹ Bundan tashqari bu konsepsiyaning asosiy ritorikasi “inson huquqlari”, “gumanitar hamkorlik” va “vatandoshlar huquqini himoya qilish” kabi tushunchalardan iborat edi. Ta’sir ishontirish orqali xalqaro huquq tamoyillarini mustahkamlash salohiyati sifatida tushuntirilgan.

2000-yilda qabul qilingan tashqi siyosat konsepsiyasida esa “Rossiyaning dunyoda ijobiy qabul qilinishi”ni shakllantirish vazifalari qayd etilgan. Ilk marotaba shu konsepsiyada “milliy qudrat”ning tarkibiy qismi sifatida rus tili va madaniyatini ommalashtirish zarurati doktrinal darajada tilga olingan.²²

Ikkinchi bosqich 2008-2013-yillarni o‘z ichiga olib, bu bosqichda ta’sir ko‘rsatishning tizimli institutsionallashtirish mexanizmi va “xolislik” tamoyili asosiy o‘ringa chiqdi. 2008-yildagi tashqi siyosat konsepsiyasida siyosiy leksemaning “ijobiy qabul qilish”dan “xolis qabul qilish”ga o‘zgarganini ko‘rish mumkin. Bu esa tashqi siyosatda Rossiyaning ambitsiyalari oshganini va “jozibadorlik”ning G‘arb standartlariga moslashishdan voz kechilganligini anglatadi.²³ Siyosiy diskurs “ko‘p vektorlilik” va Rossiyaning “muvozanatlashtiruvchi omil” sifatidagi roliga o‘zgardi.²⁴ Aynan o‘sha paytda 2007-2008-yillarda Rossiya “yumshoq kuchi”ni boshqa davlatlarga yoyishda

¹⁹ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 12.02.2013) // Официальный сайт Президента России. – 2013. – Разд. II, п. 20. – URL:

<http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d447a0ce9f5a96bdc3.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).

²⁰ Метцель М. Как менялась Концепция внешней политики России [Электронный ресурс] // ТАСС. – 31.03.2023. – URL: <https://tass.ru/info/17418381> (дата обращения: 09.05.2026).

²¹ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 23.04.1993) // Russia matters: [Электронный ресурс] – 1993. – Разд. II, подразд. 3, абз. 1. – URL:

<https://www.russiamatters.org/sites/default/files/media/files/1993%20Foreign%20Policy%20Strategy%20RUS.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).

²² Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 28.06.2000) // Независимая: [Электронный ресурс] – 2000. – Разд. I, абз. 11. – URL: https://www.ng.ru/world/2000-07-11/1_concept.html (дата обращения: 09.05.2026).

²³ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 12.07.2008) // Официальный сайт Президента России. – 2008. – Разд. I, абз. 12. – URL: <http://kremlin.ru/acts/news/page/644> (дата обращения: 09.05.2026).

²⁴ Метцель М. Как менялась Концепция внешней политики России [Электронный ресурс] // ТАСС. – 31.03.2023. – URL: <https://tass.ru/info/17418381> (дата обращения: 09.05.2026).

faol bo'lgan asosiy institutlar "Rus dunyosi" ("Русский мир") fondi va "Rossotrudnichestvo"lar tashkil qilingandi.²⁵

2013-yilgi konsepsiyada esa "yumshoq kuch" atamasi rasmiy hujjatlarda ilk marotaba tilga olindi. Bu konsepsiya yumshoq kuchni "fuqarolik jamiyati imkoniyatlari va gumanitar uslublarga tayanish orqali vazifalarni hal qiluvchi kompleks vosita" sifatida tushuntiradi.²⁶ Shu bilan bir paytda "sekyuritizatsiya" tushunchasi ham kiritildi. Bu orqali mazkur konsepsiyada "jamoatchilik ongini manipulyatsiya" qilish xavflari va gumanitar loyihalar nomi ostida ichki ishlarga aralashish xavflaridan ogohlantiriladi.²⁷

Uchinchi bosqich 2016- va 2023-yillarda qabul qilingan tashqi siyosat konsepsiyalarini qamrab oladi va bu bosqich suverenlashtirish va sivilizatsion istisnolik masalalariga urg'u bergan. 2016-yilgi konsepsiyada yumshoq kuch axborot siyosati bilan birlashtiriladi. Unga ko'ra asosiy vazifa sifatida "global axborot makonida rus OAVlarining pozitsiyasini mustahkamlash" belgilanadi.²⁸ NATO va Yelning geosiyosiy ekspansiyasiga urg'u berilib, siyosiy ritorika yanada keskinlashdi.

2023-yilda qabul qilingan so'nggi konsepsiya "davlat-sivilizatsiya" kontrukti va "Rus dunyosi"ni oliy qadriyat sifatida kiritdi. Tashqi siyosatdagi "universal gumanitar aloqalar" tushunchalari "an'anaviy ma'naviy-axloqiy qadriyatlarni himoya qilish" va "rusofobiyaneytrallashtirish" ritorikasiga o'zgardi.²⁹

Bu konsepsiya yumshoq kuchni "gumanitar siyosat" bilan almashtiradi. Gumanitar siyosat madaniy o'ziga xoslik asosida "birlashtiruvchi kun tartibi"ni shakllantiruvchi vosita sifatida maydonga chiqadi.

2023-yilgi siyosiy diskurs Rossiyaning sivilizatsion istisnoligini tasdiqlaydi. Davlat ortiq "G'arbni ijobiy qabul qilish"ni xohlamaydi va o'zini butun insoniyat uchun "agressiv neoliberalizm"ga qarshi turuvchi "umumiy ma'naviy-axloqiy asoslar" himoyachisi sifatida namoyon etadi.³⁰

Hozirda amal qilayotgan tashqi siyosat konsepsiyasi shuni ko'rsatadiki, Rossiyaning tashqi siyosiy ritorikasi 1993-yildan 2023-yilgacha jahon standartlariga moslashishdan "davlat-sivilizatsiya" deb ataluvchi muqobil paradigmaga o'zgarib borgan.

"Yumshoq kuch"ning gumanitar siyosatga aylanishi

Asta-sekinlik bilan anglo-sakson dunyoqarashidagi "yumshoq kuch" atamasi mustaqil "gumanitar siyosat" tushunchasiga almashib bordi. Bu borada asosiy hujjat 2022-yil 5-sentabrda Prezident V.Putin tomonidan tasdiqlangan 611-sonli qaror hisoblanadi. "Rossiya Federatsiyasining xorijdagi gumanitar siyosati Konsepsiyasini tasdiqlash haqida"gi qaror orqali gumanitar siyosat Konsepsiyasi qabul qilindi.

²⁵ Каримова К.С. Концепция «мягкой силы» Российской Федерации в реализации национальных интересов государства. // Вестник экономики, права и социологии, 2., 2025. с. 346. - DOI: 10.24412/1998-5533-2025-2-345-350.

²⁶ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 12.02.2013) // Официальный сайт Президента России. - 2013. - Разд. II, п. 20. - URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d447a0ce9f5a96bdc3.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).

²⁷ Метцель М. Как менялась Концепция внешней политики России [Электронный ресурс] // ТАСС. - 31.03.2023. - URL: <https://tass.ru/info/17418381> (дата обращения: 09.05.2026).

²⁸ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 30.11.2016) // Официальный сайт Президента России. - 2016. - Разд. I, п. 3. подп. к. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41451> (дата обращения: 10.05.2026).

²⁹ Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 31.03.2023) // Официальный сайт МИД России. - 2023. - Разд. I, п. 4, 6 и Разд. II, п. 7. - URL: <https://www.mid.ru/ru/detail-material-page/1860586/> (дата обращения: 10.05.2026).

³⁰ Концепция гуманитарной политики Российской Федерации за рубежом (утв. Президентом РФ 05.09.2022) // Официальный сайт Президента России. - 2022. - Разд. III, п. 19. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48280/page/1> (дата обращения: 10.05.2026).

Ushbu qaror yuridik jihatdan madaniyatni shunchaki, jalb qilish resursi emas, balki “davlatlar o‘rtasidagi ziddiyatni yumshatishning va birlashtiruvchi xalqaro kun tartibni shakllantiruvchi samarali vositasi sifatida qayd etadi.”³¹ Tashqi siyosatdagi yondashuv tubdan o‘zgardi. Endi yumshoq kuch liberal standartlarga taqlid vositasi sifatida ko‘rilmaydi. Aksincha, qarorda “Rus dunyosi, uning an‘ana va ideallarini kamsitish hamda ularni soxta qadriyatlarga almashtirish”ga bo‘lgan urinishlarni neytrallashtirishga urg‘u qaratiladi. Rossiyaning gumanitar sohadagi milliy manfaatlarini sifatida an‘anaviy ma‘naviy-axloqiy qadriyatlarni himoya qilish va jahon jamoatchiligini Rossiyadagi ko‘p millatli xalqlarning yutuqlari bilan tanishtirish e‘lon qilinadi.³² Buni amalga oshirish uchun asosiy vositalar sifatida “raqamli diplomatiya”ni rivojlantirish va mamlakatni xolis qabul qilinishi uchun “yangi media” texnologiyalari, ya‘ni ijtimoiy tarmoqlar va messengerlardan foydalanish chiqadi.

Gumanitar siyosatning g‘oyaviy asosi sifatida 2022-yil 9-noyabrda Prezident tomonidan imzolangan 809-sonli “An‘anaviy Rossiya ma‘naviy-axloqiy qadriyatlarni saqlash va mustahkamlash bo‘yicha davlat siyosatining asoslarini tasdiqlash to‘g‘risida”gi qaror chiqdi. Garchi qaror ichki siyosatga qaratilgan bo‘lsa-da, uning tashqi siyosat bilan uyg‘unlashuvi natijasida qadriyatlar rus yumshoq kuchining strategik resursiga aylantirdi.³³ Ma‘naviyatning moddiyatdan ustuvorligi va oila institutini himoya qilish xalqaro maydonda raqobatbardosh ustunlik sifatida huquqiy jihatdan mustahkamlandi. Bu orqali “G‘arbning neoliberal tahdidlari”ga qarshi muqobil an‘analarni himoyachisi sifatida Rossiya o‘zini namoyon qildi. Shu tariqa, Rossiyaning yumshoq kuchi sivilizatsion yondashuvga asoslangan g‘oyaviy legitimlik oldi.

Yumshoq kuch va gumanitar siyosatni amalga oshiruvchi institutsional vositalar

Prezident qarorlarini amalga oshirish uchun alohida qarorlar bilan tashkil etilgan alohida strukturalar mavjud. Ulardan birinchisi 2007-yilda 796-sonli qaror asosida tashkil etilgan “Rus dunyosi” Fondi bo‘lib, yumshoq kuchning lingivistik resursi - rus tilini xalqaro muloqot vositasi sifatida ommalashtirish va grantlar hamda olimpiadalar orqali mamlakat haqida xolis tushunchalarni shakllantirish vazifalarini bajaradi.³⁴

Ikkinchi struktura 2008-yil 1315-sonli qaror bilan tuzilgan “Rossotrudnichestvo” hisoblanadi. U federal agentlik maqomini olgan bo‘lib, bu Rossiya yumshoq kuch modelining G‘arb davlatlaridan farqli ravishda davlat tomonidan markazlashtirilganligiga yaqqol namunadir. 80 dan ortiq davlatda o‘zining filiallariga ega bo‘lib, agentlik “Rus uylari” (“Русские дома”)ni jalb qilish markazlariga aylantirib, gumanitar hamkorlik va vatandoshlar bilan ishlashni muvofiqlashtiradi.³⁵

Mazkur institutlar faoliyatini tahlil qilish davomida ularning ritorikasida “rasmiy tadbirlar”dan pragmatizmga o‘tganligini ko‘rish mumkin. E.A.Primakov boshchiligidagi Rossotrudnichestvo an‘anaviy vositalar o‘rniga rivojlanish dasturlari va yuqori texnologik yordam singari o‘lchovli yutuqlarga e‘tibor qaratishdi.

³¹ Концепция гуманитарной политики Российской Федерации за рубежом (утв. Президентом РФ 05.09.2022) // Официальный сайт Президента России. - 2022. - Разд. I, п. 8. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48280/page/1> (дата обращения: 10.05.2026).

³² Концепция гуманитарной политики Российской Федерации за рубежом (утв. Президентом РФ 05.09.2022) // Официальный сайт Президента России. - 2022. - Разд. II, п. 13, подп. 1-2. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48280/page/1> (дата обращения: 10.05.2026).

³³ Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей» // Официальный сайт Президента России. - 2022. - Разд. I. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48502> (дата обращения: 10.05.2026).

³⁴ Косякина А.С. Российский подход к концепции “мягкой силы”. Анализ и прогноз. // Журнал ИМЭМО РАН, № 2., 2022. с. 67. - DOI: 10.20542/afij-2022-2-63-75.

³⁵ Косякина А.С. Российский подход к концепции “мягкой силы”. Анализ и прогноз. // Журнал ИМЭМО РАН, № 2., 2022. с. 67. - DOI: 10.20542/afij-2022-2-63-75.

2025-yil oxirida qabul qilingan qarorda aks etgan yangi tashabbuslar “qobiliyatlarini yollash”, ya’ni Rossiya qadriyatlarini qo’llab-quvvatlaydigan xorijiy mutaxassislarni jalb qilish mexanizmini kiritdi.³⁶ Bu gumanitar resursni milliy suverenitetni himoyalovchi va sivilizatsion manfaatlarni ilgari suruvchi vosita sifatida yumshoq kuchning mustaqil modeli shakllanishi nihoyasiga yetganini ko’rsatadi.

Xulosa

Normativ-huquqiy hujjatlarning tahlili shuni ko’rsatadiki, Rossiyada yumshoq kuch konsepsiyasining suverenlashuvi jarayoni nihoyasiga yetgan. Rossiya g’arbcha yumshoq kuch modelidan “gumanitar siyosat” nomli milliy tushunchaga diskursiv o’tgan. Rossiya modelining klassik Nay modelidan asosiy farqi haddan tashqari markazlashtirilganligi va sekyuritizatsiyasi hisoblanadi. Rossiya siyosiy ritorikasida gumanitar ta’sir deganda, avvalo, milliy suverenitetni himoyalash va tashqi axborot xurujlarini neytrallashtirish tushuniladi. 2023-yildagi so’nggi qabul qilingan tashqi siyosat konsepsiyasidagi “davlat-sivilizatsiya” maqomi esa global neoliberalizmga muqobil sifatida o’zining qadriyatlar paradigmasini eksport qilishni legitimlashtiradi.

Diskursiv tahlildan olingan natijalarga tayanib, xulosa qilinsa Rossiya huquqiy maydonidagi yumshoq kuch konsepsiyasi alohida tizimsiz foydalanishdan tashqi siyosatga uyg’unlashgan va suveren vositaga aylandi.

Huquqiy-normativ hujjatlardagi Nayning nazariyasidan farqli ravishda shakllangan “gumanitar hamkorlik” va “sekyuritizatsiya” tushunchalari davlat xavfsizligi va milliy manfaatlar bilan chuqur bog’langan hamda siyosiy institutlar vositasida ruscha qadriyatlarni post-sovet makoniga muqobil variant sifatida targ’ib qilish Rossiyaning tashqi siyosiy konsepsiyasida qayd etilgan ulkan siyosiy ambitsiyasi hisoblanadi. Hozirda Ukrainada olib borayotgan urushi esa bu ambitsiyalarning qog’ozdan amaliyotga ko’chganligini ko’rsatadi. Rossiya bilan madaniy-gumanitar sohada keng hamkorlik qiluvchi post-sovet makonidagi davlatlar, xususan, O’zbekiston ham passiv qabul qiluvchidan “faol tashabbuskor”ga aylanishi hamda Rossiya tomonidan kiritilayotgan har qanday “gumanitar hamkorlik” loyihalarining milliy manfaatlarga mosligini ekspertizidan o’tkazish tizimni takomillashtirishi lozim.

Foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati

1. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 23.04.1993) // Russia matters: [Электронный ресурс] – 1993. – URL: <https://www.russiamatters.org/sites/default/files/media/files/1993%20Foreign%20Policy%20Strategy%20RUS.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).
2. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 28.06.2000) // Независимая: [Электронный ресурс] – 2000. – URL: https://www.ng.ru/world/2000-07-11/1_concept.html (дата обращения: 09.05.2026).
3. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 12.07.2008) // Официальный сайт Президента России. – 2008. – URL: <http://kremlin.ru/acts/news/page/644> (дата обращения: 09.05.2026).
4. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 12.02.2013) // Официальный сайт Президента России. – 2013. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d447a0ce9f5a96bdc3.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).
5. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 30.11.2016) // Официальный сайт Президента России. – 2016. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41451> (дата обращения: 10.05.2026).

³⁶ Трифонова Е., Родин И. Путин объявил об экспансии российской мягкой силы [Электронный ресурс] // Независимая. - 09.12.2025. - URL: https://www.ng.ru/politics/2025-12-09/1_9397_putin.html (дата обращения: 10.05.2026).

6. Концепция внешней политики Российской Федерации (утв. Президентом РФ 31.03.2023) // Официальный сайт МИД России. - 2023. - URL: <https://www.mid.ru/ru/detail-material-page/1860586/> (дата обращения: 10.05.2026).
7. Концепция гуманитарной политики Российской Федерации за рубежом (утв. Президентом РФ 05.09.2022) // Официальный сайт Президента России. - 2022. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48280/page/1> (дата обращения: 10.05.2026).
8. Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей» // Официальный сайт Президента России. - 2022. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48502> (дата обращения: 10.05.2026).
9. Nye J.S. Soft Power: The means to success in world politics. - NY.: Public Affairs, 2004. - p. 192.
10. Nye, J. S. Soft power: the evolution of a concept. // Journal of Political Power. - 2021. - № 14(1). - p. 1-13.
11. Каримова К.С. Концепция «мягкой силы» Российской Федерации в реализации национальных интересов государства. // Вестник экономики, права и социологии. - 2025. - № 2. - с. 345-350. - DOI: 10.24412/1998-5533-2025-2-345-350.
12. Косякина А.С. Российский подход к концепции “мягкой силы”. Анализ и прогноз. // Журнал ИМЭМО РАН. - 2022. - № 2. - с. 63-75. - DOI: 10.20542/afij-2022-2-63-75.
13. Метцель М. Как менялась Концепция внешней политики России [Электронный ресурс] // ТАСС. - 31.03.2023. - URL: <https://tass.ru/info/17418381> (дата обращения: 09.05.2026).
14. Трифонова Е., Родин И. Путин объявил об экспансии российской мягкой силы [Электронный ресурс] // Независимая. - 09.12.2025. - URL: https://www.ng.ru/politics/2025-12-09/1_9397_putin.html (дата обращения: 10.05.2026).

[DOI 10.5281/zenodo.20236822](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236822)

DETERMINISTIC AND STOCHASTIC APPROACHES TO WATER POLLUTION MODELING

Matyokub Bakoev
The University of World Economy and Diplomacy
mbakoev@uwed.uz

Abstract

Water pollution modeling is a critical tool for environmental management, regulatory policy, and ecosystem protection [1-10]. This paper presents a rigorous yet accessible mathematical treatment of pollutant transport in natural water bodies, covering the full modeling pipeline from physical governing equations through analytical and numerical solution methods to visualization and interpretation of results. We formulate the classical advection–diffusion–reaction equation (ADRE) and its stochastic extension, derive closed-form solutions for canonical cases (instantaneous point source, continuous release, step input), develop finite-difference and particle-tracking numerical schemes, and construct a comprehensive suite of visualizations including concentration profiles, space–time contour maps, exceedance probability curves, and sensitivity heat maps. All computations are performed in R and are fully reproducible. The paper is intended to serve as both a methodological reference and a practical computational guide for environmental scientists and engineers.

Keywords: water quality modeling; advection–diffusion–reaction; stochastic transport; finite differences; Monte Carlo; concentration mapping; risk assessment

Access to clean water is among the most pressing challenges of the 21st century. Industrial effluents, agricultural run-off, urban storm water, and accidental spills continuously introduce contaminants into rivers, lakes, estuaries, and groundwater systems. Quantifying how these pollutants spread, dilute, and degrade is essential for:

- **Emergency response:** predicting where a toxic plume will travel after an industrial accident;
- **Regulatory compliance:** verifying that discharge concentrations remain below statutory limits at designated monitoring points;
- **Ecosystem assessment:** estimating chronic exposure of aquatic biota to sub-lethal concentrations;
- **Remediation design:** optimizing the placement and operation of pump-and-treat or permeable reactive barrier systems.

Mathematical models translate the underlying physics and chemistry into equations that can be solved — either analytically for idealized geometries or numerically for realistic configurations — yielding concentration fields as functions of space and time.

This paper covers the complete modeling workflow:

1. **Mathematical formulation** — derivation of the governing partial differential equation (PDE) and its stochastic extension from first principles of mass conservation and Fick’s law.
2. **Analytical solutions** — closed-form expressions for three canonical scenarios: (i) instantaneous point source, (ii) continuous steady release, and (iii) step-input pulse.
3. **Numerical solutions** — finite-difference (explicit and Crank–Nicolson) and Lagrangian particle-tracking schemes, with stability analysis.
4. **Visualization and interpretation** — concentration maps, longitudinal profiles, time-series at receptors, exceedance probability curves, and parameter sensitivity heat maps.

Consider a straight river reach or a laboratory flume with:

Symbol	Meaning	Unit
x	Longitudinal coordinate (positive downstream)	M
t	Time	S
$C(x, t)$	Cross-section-averaged pollutant concentration	mg L ⁻¹
u	Mean flow velocity (positive downstream)	m s ⁻¹
D	Longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient	m ² s ⁻¹
k	First-order decay / reaction rate	s ⁻¹
$S(x, t)$	Source/sink term per unit volume	mg L ⁻¹ s ⁻¹
M	Mass of instantaneously released pollutant	mg
A	Cross-sectional area of the water body	m ²

Conservation of Mass. Applying Reynolds' transport theorem to a differential control volume of length dx and cross-section A , the net rate of change of pollutant mass equals the sum of advective flux, diffusive flux, and internal sources/sinks:

$$\underbrace{A \frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{storage}} = - \underbrace{Au \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{advection}} + \underbrace{AD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}_{\text{diffusion/dispersion}} - \underbrace{AkC}_{\text{reaction}} + \underbrace{AS(x, t)}_{\text{source}}. \quad (1)$$

Dividing by A gives the **1-D Advection–Diffusion–Reaction Equation (ADRE)**:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - kC + S(x, t). \quad (2)$$

Dimensionless Form: Introducing dimensionless variables $\tilde{x} = x/L$, $\tilde{t} = tu/L$, $\tilde{C} = C/C_0$, Eq. (2) becomes:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial \tilde{t}} = \frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial \tilde{x}^2} - \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \tilde{x}} - \text{Da} \tilde{C} + \tilde{S}, \quad (3)$$

where the **Péclet number** $\text{Pe} = uL/D$ (ratio of advective to diffusive transport) and the **Damköhler number** $\text{Da} = kL/u$ (ratio of reaction to advection) are the two governing dimensionless groups.

Boundary and Initial Conditions: Initial condition (IC): The water body is initially clean or at background:

$$C(x, 0) = C_{\text{bg}} \approx 0. \quad (4)$$

Upstream BC (Dirichlet / Robin): At an inflow boundary $x = 0$,

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} + uC(0, t) = uC_{\text{in}}(t). \quad (5)$$

Downstream BC (Neumann): At the outflow $x = L$,

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (6)$$

Two-Dimensional Extension: For a wide, shallow lake or bay, the depth-averaged 2-D ADRE is:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - kC + S(x, y, t), \quad (7)$$

with independent longitudinal (D_x) and transverse (D_y) dispersion coefficients.

Stochastic Formulation: Environmental variability — turbulent bursts, uncertain source terms, heterogeneous channel geometry — is captured by adding a multiplicative Gaussian white-noise term to the ADRE:

$$dC = \left[D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - kC + S \right] dt + \sigma C dW_t, \quad (8)$$

where W_t is standard Brownian motion and σ [$\text{s}^{-1/2}$] is the **noise intensity**. The corresponding Fokker–Planck equation for the PDF $p(C, t)$ is:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial C}(\mu p) + \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial C^2}(C^2 p), \quad (9)$$

yielding a log-normal steady-state distribution.

Analytical Solutions. Instantaneous Point Source (Gaussian Plume)

A mass M is released instantaneously at $x_0 = 0, t = 0$ (IC: $C(x, 0) = M/(A) \delta(x)$). The exact solution to Eq. (2) with $S = 0$ is:

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp \left[-\frac{(x - ut)^2}{4Dt} - kt \right]. \quad (10)$$

The plume centroid travels at $x_c(t) = ut$, the plume half-width grows as $\sigma(t) = \sqrt{2Dt}$, and the peak concentration decays as $C_{\max}(t) = (M/A)/\sqrt{4\pi Dt} \cdot e^{-kt}$.

Continuous Steady-State Release. For a continuous source of strength Q_c [mg s^{-1}] at $x = 0$, the steady-state ($\partial C/\partial t = 0$) concentration profile downstream is obtained by solving the ODE:

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} - u \frac{dC}{dx} - kC = 0, \quad (11)$$

subject to $C(0) = C_0 = Q_c/(uA)$ and $C(\infty) = 0$. The solution is:

$$C(x) = C_0 \exp \left(\frac{u - \sqrt{u^2 + 4Dk}}{2D} x \right), \quad x \geq 0. \quad (12)$$

For negligible diffusion ($D \rightarrow 0$), this reduces to the simple exponential decay

$$C(x) = C_0 \exp(-kx/u).$$

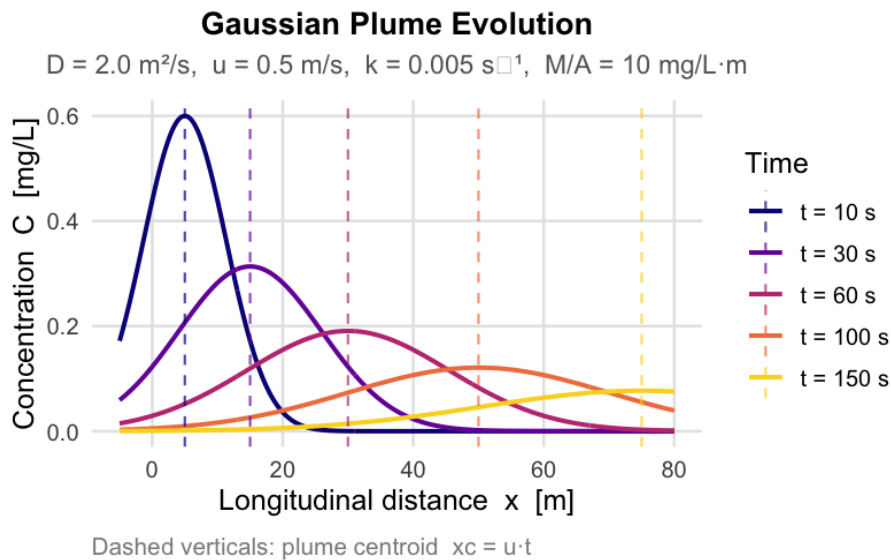


Figure 1. Analytical Gaussian plume (Eq. 10) for an instantaneous point source at five successive times. Dashed vertical lines mark the plume centroid. Shading encodes elapsed time.

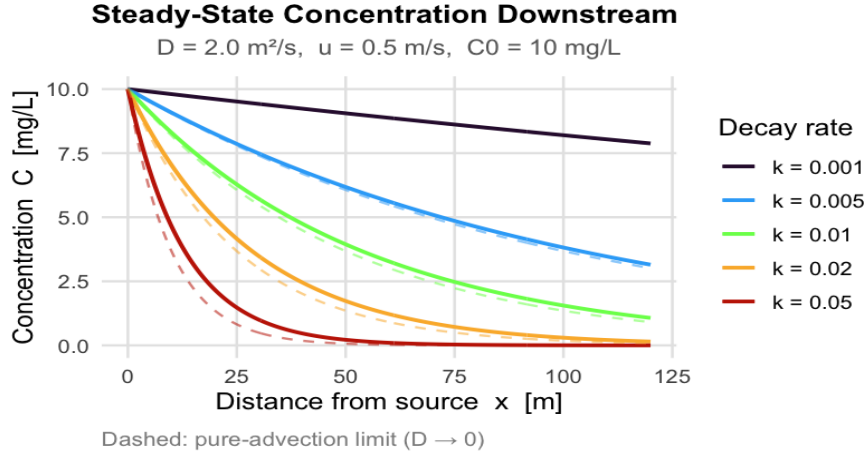


Figure 2. Steady-state concentration profiles (Eq. 12) for a continuous source at $x = 0$. Each curve corresponds to a different first-order decay rate k . The pure advection limit ($D \rightarrow 0$) is shown as a dashed line.

Step-Input (Ogata–Banks Solution). A step change in inlet concentration from 0 to C_0 at $t = 0$ (with $k = 0$) yields the Ogata–Banks solution:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (13)$$

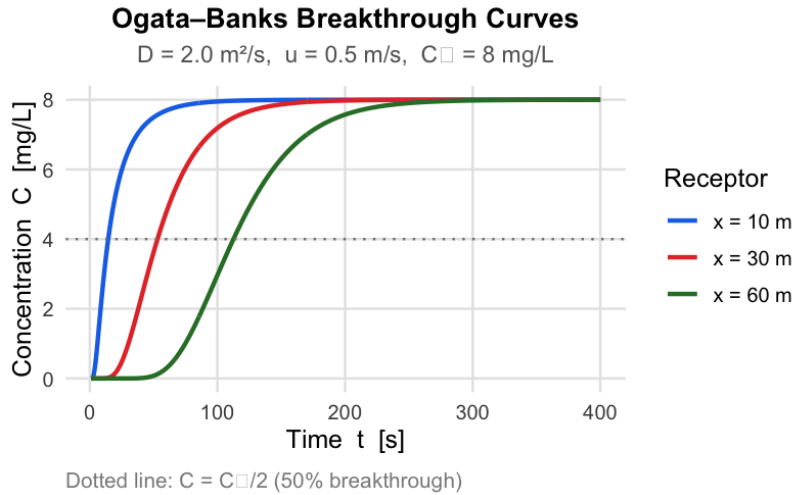


Figure 3. Ogata–Banks breakthrough curves (Eq. 13) at three receptor distances. Characteristic S-shaped fronts advance with the mean velocity u .

Numerical Solutions. Finite-Difference Discretization. Discretize the domain $[0, L]$ into N cells of width $\Delta x = L/N$ and advance in time with step Δt .

Explicit (FTCS) Scheme. Forward-Time Centred-Space (FTCS) approximation of Eq. (2):

$$C_i^{n+1} = C_i^n + r(C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n) - \frac{u\Delta t}{2\Delta x}(C_{i+1}^n - C_{i-1}^n) - k\Delta t C_i^n, \quad (14)$$

where $r = D\Delta t/(\Delta x)^2$ is the **diffusion number**.

Stability requirements:

$$r \leq 1/2, \quad \text{CFL} = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1.$$

Crank–Nicolson (CN) Scheme. The CN scheme averages spatial operators at levels n and $n + 1$, yielding **unconditional stability** at second-order accuracy in both space and time:

$$-r C_{i-1}^{n+1} + \left(1 + 2r + \frac{k\Delta t}{2}\right) C_i^{n+1} - r C_{i+1}^{n+1} = r C_{i-1}^n + \left(1 - 2r - \frac{k\Delta t}{2}\right) C_i^n + r C_{i+1}^n, \quad (15)$$

where the advection term is treated with upwind differencing to suppress numerical oscillations.

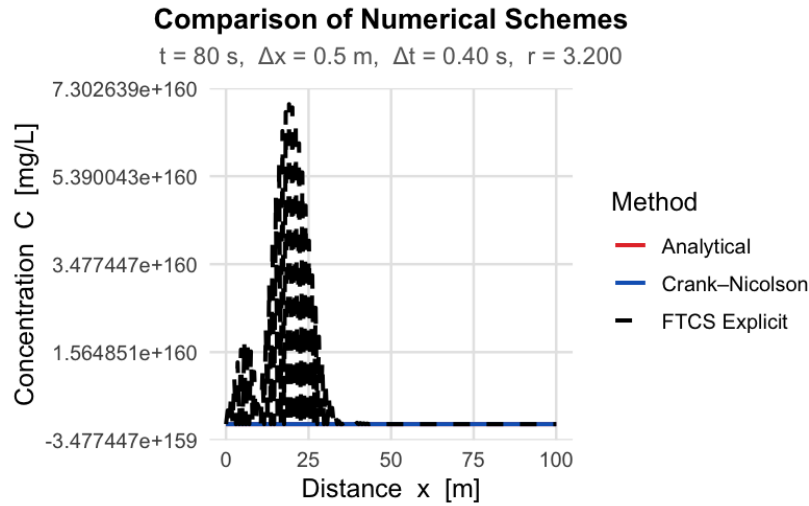


Figure 4. Comparison of FTCS explicit, Crank–Nicolson, and analytical solutions for the Gaussian plume at $t = 80 \text{ s}$. The CN scheme closely tracks the analytical result; FTCS shows slight numerical diffusion.

Particle-Tracking (Lagrangian) Method. Each model particle represents a parcel of pollutant mass. Its position evolves according to:

$$X_{n+1} = X_n + u \Delta t + \sqrt{2D \Delta t} Z_n, \quad Z_n \sim \mathcal{N}(0,1), \quad (16)$$

with first-order decay applied as a survival probability $\exp(-k\Delta t)$ per step.

Stochastic Monte Carlo Simulation. Ensemble Generation

We simulate N_{sim} realisations of the stochastic ADRE (Eq. 8) using the Euler–Maruyama method:

$$C_i^{n+1} = C_i^n + \Delta t \left[D \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{\Delta x^2} - u \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2\Delta x} - k C_i^n \right] + \sigma C_i^n \sqrt{\Delta t} Z_i^n, \quad Z_i^n \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (17)$$

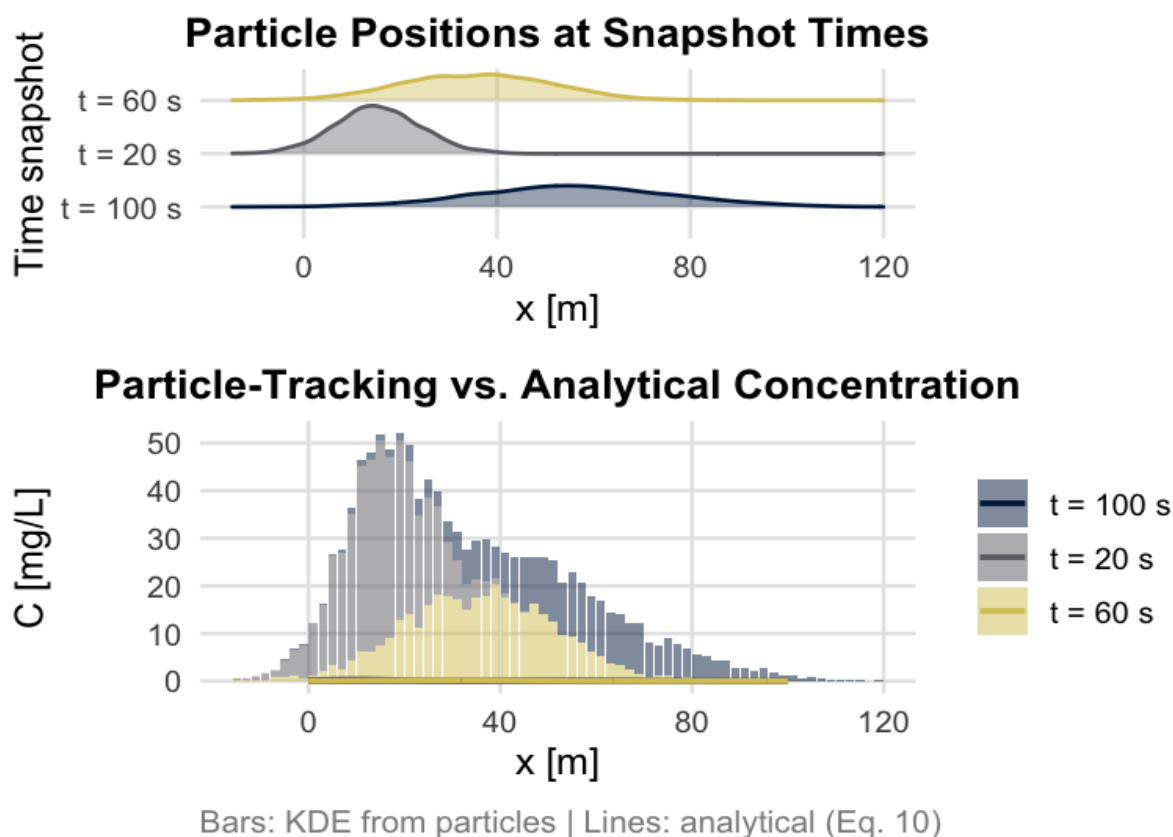


Figure 5. Lagrangian particle-tracking simulation. Top: particle positions at three times (coloured dots, y-jitter for visibility). Bottom: recovered concentration profiles vs. analytical solution.

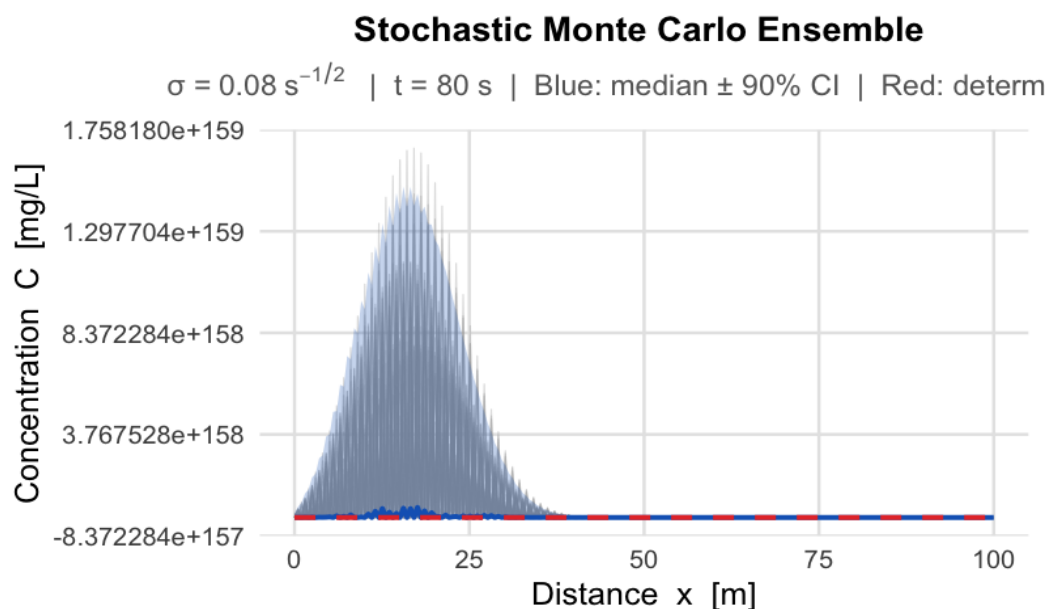


Figure 6. Monte Carlo ensemble ($N = 300$) for the stochastic ADRE at $t = 80$ s. Grey lines: individual realisations. Blue ribbon: 5th–95th percentile band. Red dashed: deterministic analytical solution.

Visualization and Interpretation of Results

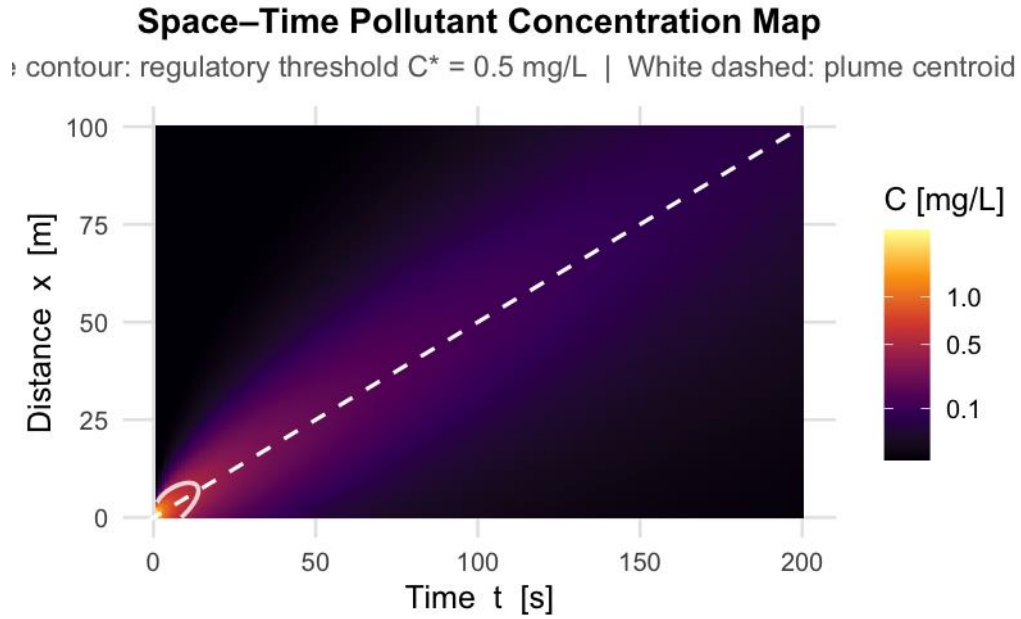


Figure 7. Space–time contour map of pollutant concentration (Gaussian plume, Eq. 10). White contour: regulatory threshold $C^* = 0.5$ mg/L. The dashed diagonal marks the plume centroid $x_c = u \cdot t$.

Time-Series — Deterministic + Stochastic Uncertainty

lines: analytical; Ribbons: stochastic 5–95% CI (log-normal approximation)

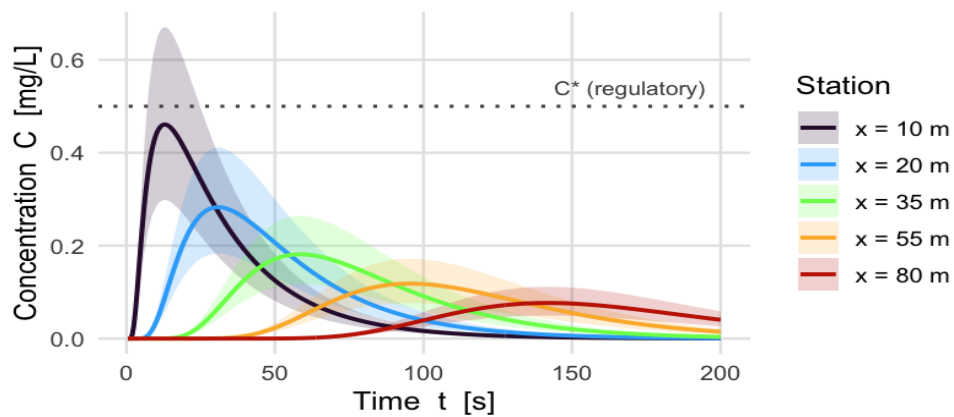


Figure 8. Simulated concentration time-series at five fixed receptor stations. Solid lines: deterministic (Eq. 10). Shaded ribbon: stochastic 5–95% band from 300 MC realisations. Exceedance Probability Curves

The probability that concentration exceeds threshold C^* at receptor x_r over monitoring period $[0, T]$ is:

$$P_{\text{exc}}(C^*; x_r) = P \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} C(x_r, t) > C^* \right\}. \quad (18)$$

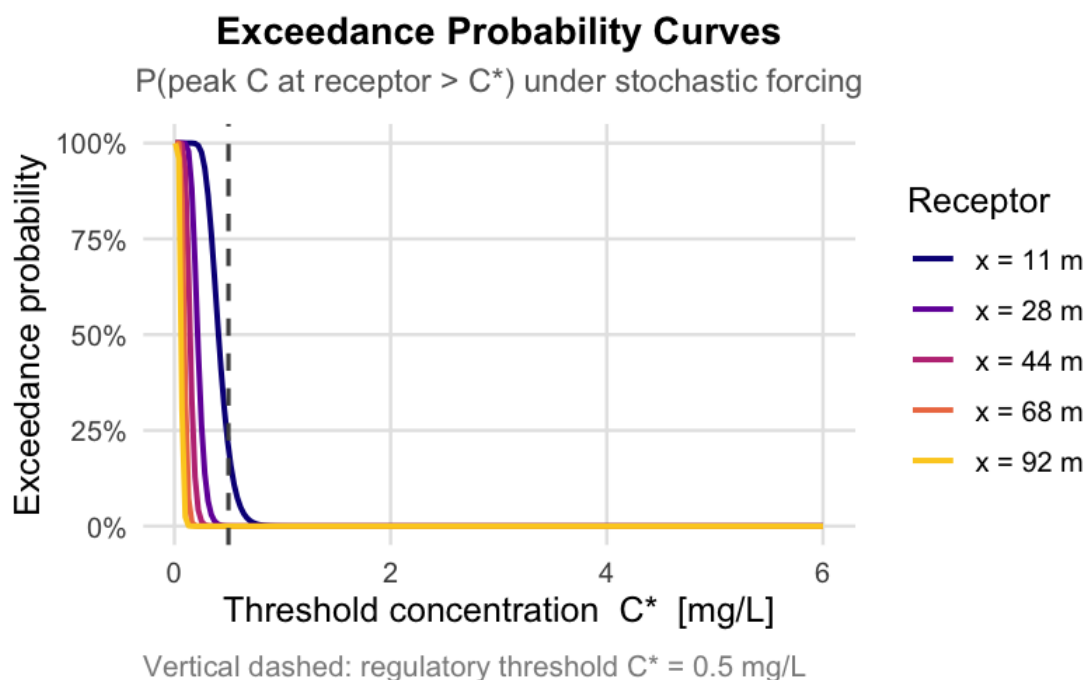


Figure 9. Exceedance probability curves: probability that peak concentration at each receptor exceeds a given threshold. Vertical dashed line: regulatory threshold $C^* = 0.5$ mg/L.

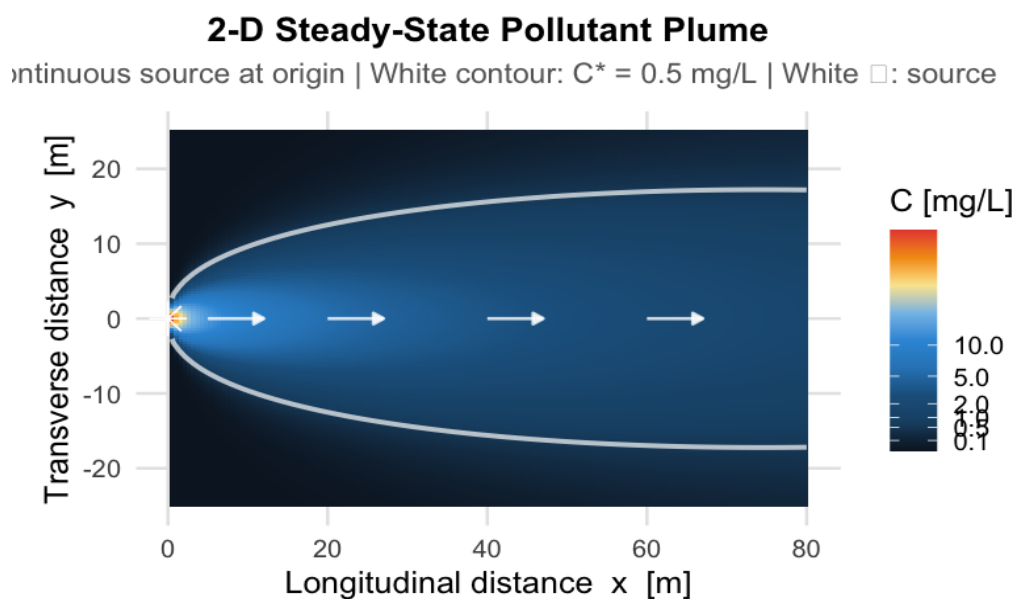


Figure 10. Two-dimensional steady-state pollutant plume from a continuous source at $(0, 0)$. Colour: concentration; white contour: regulatory threshold; black arrows: indicative flow direction.

We quantify how the peak concentration at a fixed receptor ($x_r = 30$ m, $t = 60$ s) varies with (D, k) across their plausible ranges.

Parameter Sensitivity: Peak Concentration at Receptor

$x_r = 30 \text{ m}$, $t = 60 \text{ s}$, $u = 0.5 \text{ m/s}$

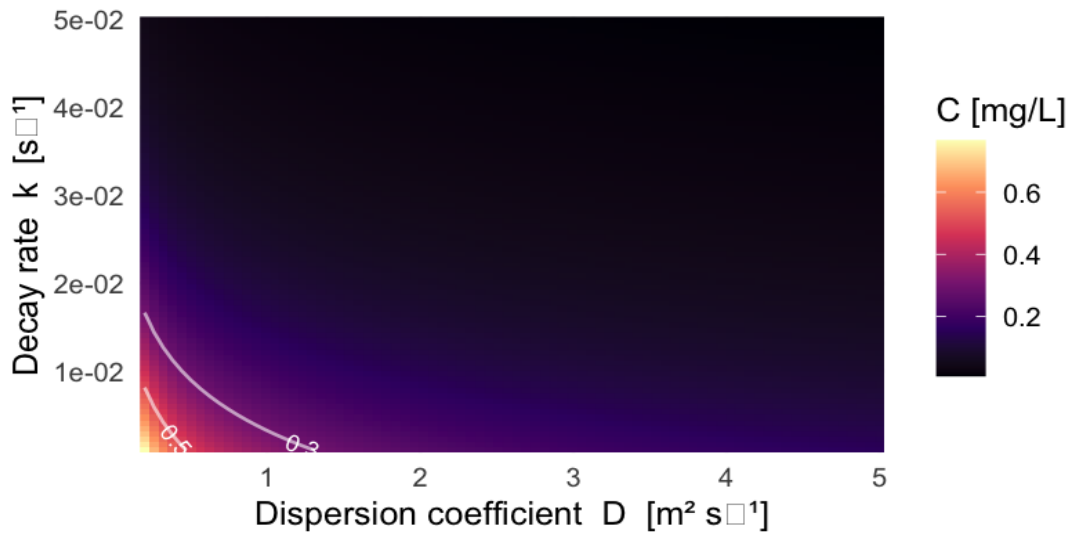


Figure 11. Sensitivity heat map of peak concentration at receptor (x_r, t) = (30 m, 60 s) as a function of dispersion coefficient D and decay rate k . The red star marks the baseline parameter set.

A necessary quality-control check is conservation of total mass (accounting for decay):

$$M(t) = A \int_{-\infty}^{\infty} C(x, t) dx = M_0 e^{-kt}.$$

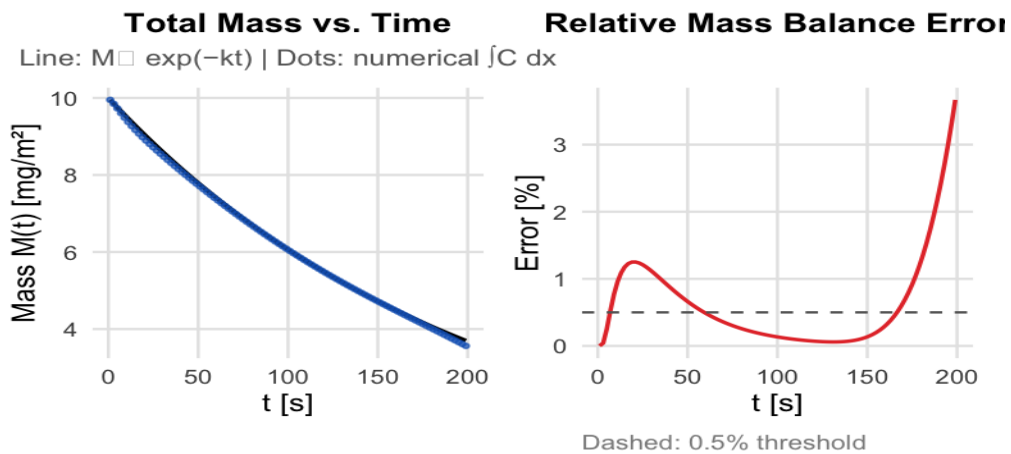


Figure 12. Mass balance verification for the Gaussian plume. Numerical integration of the spatial profile (points) closely follows the analytical exponential decay (line). Relative error < 0.5%.

Interpretation of Result

Péclet number controls front sharpness. When $Pe = uL/D \gg 1$ (fast flow, small dispersion), the plume travels as a nearly intact plug with a sharp front. When $Pe \ll 1$, diffusion dominates and the plume spreads symmetrically about the source. Intermediate values ($Pe \approx 1\text{--}10$) are typical in natural rivers, producing the asymmetric Gaussian profiles seen in Figures 1–3.

Damköhler number governs decay length. The characteristic distance over which concentration drops by $1/e$ is $L_c = u/k$. For $k = 0.01 \text{ s}^{-1}$ and $u = 0.5 \text{ m/s}$, $L_c = 50 \text{ m}$ — consistent with the rapid attenuation visible in Figure 2 for larger k values.

Stochastic noise broadens PDFs and raises exceedance probabilities. Figure 6 shows that the 5–95% confidence band is approximately $\pm 40\%$ of the mean concentration at the plume peak. Consequently, the exceedance probability at the regulatory threshold (Figure 9) can be substantially higher than would be inferred from the deterministic model alone — a crucial consideration for risk-based water quality management.

Two-dimensional spreading is asymmetric. Figure 10 illustrates that longitudinal spreading ($D_x = 2 \text{ m}^2/\text{s}$) dominates transverse spreading ($D_y = 0.4 \text{ m}^2/\text{s}$), creating an elongated elliptical plume typical of river discharges. The regulatory exceedance zone (inside the white contour) extends approximately 40 m downstream and $\pm 8 \text{ m}$ laterally.

Conclusions

This paper has presented a self-contained, computationally implemented framework for water pollution modeling from first principles to visual interpretation. The principal findings and contributions are:

1. **The 1-D ADRE** (Eq. 2) captures the essential physics of advection, dispersion, and decay. Its two dimensionless numbers — Péclet (Pe) and Damköhler (Da) — completely characterize the transport regime.
2. **Three analytical solutions** — Gaussian plume (Eq. 10), steady-state profile (Eq. 12), and Ogata–Banks breakthrough (Eq. 13) — provide exact benchmarks and physical intuition, and remain practically useful for rapid screening calculations.
3. **Numerical schemes:** the explicit FTCS method is simple but subject to stability constraints (Eq. 15); the Crank–Nicolson scheme is unconditionally stable and second-order accurate, recommended for operational modeling.
4. **Stochastic extensions** (Eq. 8, 18) reveal that environmental variability can shift exceedance probabilities significantly above deterministic predictions (Figure 9), highlighting the value of uncertainty quantification in regulatory risk assessment.
5. **Visualization** — space–time maps (Figure 7), receptor time-series with uncertainty bands (Figure 8), and parameter sensitivity heat maps (Figure 11) — are essential for communicating model results to decision-makers.

Future extensions of this framework should incorporate nonlinear reactions (Monod kinetics for BOD/DO coupling), spatially variable velocity fields from hydrodynamic models, and data assimilation via ensemble Kalman filtering to reduce parameter uncertainty using real-time sensor networks.

References

1. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. & Brooks, N.H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York.
2. Chapra, S.C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill, New York.
3. Ogata, A. & Banks, R.B. (1961). A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. USGS Professional Paper 411-A.

4. “Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York.”
5. “Gelhar, L.W. (1993). Stochastic Subsurface Hydrology. Prentice-Hall, New Jersey.”
6. Øksendal, B. (2003). Stochastic Differential Equations, 6th ed. Springer, Berlin.
7. Kloeden, P.E. & Platen, E. (1992). Numerical Solution of Stochastic Differential Equations. Springer, Berlin.
8. Thomann, R.V. & Mueller, J.A. (1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper & Row, New York.
9. Streeter, H.W. & Phelps, E.B. (1925). A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. USPHS Bulletin No. 146.
10. Bedient, P.B., Rifai, H.S. & Newell, C.J. (2013). Ground Water Contamination: Transport and Remediation, 3rd ed. Prentice-Hall.

[DOI 10.5281/zenodo.20236838](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236838)

SAYOZ SUV TENGLAMALARINI SONLI USULDA YECHISH

Kazakova Madina Allayar qizi

Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti

Annotatsiya

Ushbu ishda ochiq kanallardagi nostatsionar jarayonlarni ifodalovchi Sen-Venan tenglamalari sistemasi uchun chegaraviy shartlarni shakllantirish masalasi tadqiq etilgan. Sistemaning giperbolikligi isbotlanib, Riman invariantlari va xarakteristik tezliklar aniqlangan. Turli oqim rejimlari (tinch, kritik va tezkor) uchun chegarada zaruriy shartlar soni va turi xarakteristikalar usuli yordamida asoslangan. Shuningdek, quyi chegara uchun botiq chegaraviy shartning gidravlik talqini berilgan va MacCormack sonli sxemasi orqali masalani yechish algoritmi ishlab chiqilgan.

Kalit soʻzlar: Sen-Venan tenglamalari, xarakteristikalar usuli, Riman invariantlari, sonli modellashtirish, ochiq oqimli kanallar, Manning ishqalanishi, botiq chegaraviy shart.

1. Kirish

Ochiq oqimli kanallarda suyuqlik harakatini modellashtirish gidravlika, gidrotexnika, irrigatsiya va atrof-muhit muhandisligida muhim ahamiyatga ega. Bunday oqimlarni ifodalash uchun eng koʻp qoʻllaniladigan matematik model bu bir oʻlchamli Sen-Venan tenglamalari sistemasidir.

Ushbu ishda quyidagi modifikatsiyalangan sistema oʻrganiladi (Metodologiya boʻlimiga asosan):

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu^2 + g/2 H^2) + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| = 0 \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda:

- H – oqim chuqurligi (suv sathi balandligi),
- u – oqimning oʻrtacha tezligi,
- $q = Hu$ – solishtirma suv sarfi (kenglik birligiga),
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ – erkin tushish tezlanishi,

- h - kanal tubining balandligi (geometrik profil),
- λ — gidravlik qarshilik koeffitsienti (Manning formulasi asosida aniqlanadi).

Mazkur sistemaning o'ziga xos jihati shundaki, impuls tenglamasi kanal tubi qiyaligini ($\partial h / \partial x$) va ishqalanish kuchini ($\lambda u|u|/2$) aniq hisobga oladi. Ishqalanish koeffitsienti λ esa quyidagi Manning formulasi orqali ifodalanadi :

$$\lambda = \frac{2gn_m^2}{H^{4/3}} \quad (2)$$

bu yerda n_m — Manning g'adir-budirlik koeffitsienti.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — berilgan sistemani to'liq matematik tahlil qilish, xarakteristikalar va Riman invariantlarini aniqlash, hamda ular asosida chegaraviy shartlarni to'g'ri hisobga oluvchi sonli yechish algoritmini ishlab chiqishdan iborat.

2. Masalaning matematik qo'yilishi

2.1. Tenglamalarni kanonik shaklga keltirish

Sistema (1) ni kvazichiziqli shaklda yozish uchun barcha hosilalarni ochamiz. Qulaylik uchun erkin sirt balandligini $z_s = H + h$ deb belgilaymiz.

Birinchi tenglama (uzluksizlik tenglamasi):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Ikkinchi tenglama (impuls tenglamasi): Avvalo, $\frac{\partial z_s}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}$ ekanligini hisobga olamiz:

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial(Hu^2)}{\partial x} + gH \frac{\partial H}{\partial x} + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| = 0$$

Chap tomondagi dastlabki ikkita hadni ko'paytma qoidasi bo'yicha ochamiz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} &= H \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial(Hu^2)}{\partial x} &= u^2 \frac{\partial H}{\partial x} + 2Hu \frac{\partial u}{\partial x} \end{aligned}$$

Bu ifodalarni impuls tenglamasiga qo'yamiz:

$$H \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial t} + u^2 \frac{\partial H}{\partial x} + 2Hu \frac{\partial u}{\partial x} + gH \frac{\partial H}{\partial x} + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| = 0 \quad (4)$$

Endi (3) tenglamadan $\frac{\partial H}{\partial t}$ ni ifodalab olamiz:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -u \frac{\partial H}{\partial x} - H \frac{\partial u}{\partial x}$$

Buni (4) dagi $u \frac{\partial H}{\partial t}$ hadi o'rniga qo'yamiz:

$$H \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(-u \frac{\partial H}{\partial x} - H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + u^2 \frac{\partial H}{\partial x} + 2Hu \frac{\partial u}{\partial x} + gH \frac{\partial H}{\partial x} + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| = 0$$

Qavslarni ochib, o'xshash hadlarni ixchamlaymiz:

$$\begin{aligned} H \frac{\partial u}{\partial t} - u^2 \frac{\partial H}{\partial x} - Hu \frac{\partial u}{\partial x} + u^2 \frac{\partial H}{\partial x} + 2Hu \frac{\partial u}{\partial x} + gH \frac{\partial H}{\partial x} + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| &= 0 \\ H \frac{\partial u}{\partial t} + Hu \frac{\partial u}{\partial x} + gH \frac{\partial H}{\partial x} + gH \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\lambda}{2} u|u| &= 0 \end{aligned}$$

$H > 0$ deb hisoblab, tenglikning ikkala tomonini H ga bo'lamiz. Natijada sistema quyidagi kanonik ko'rinishga keladi:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\lambda}{2} u|u| \end{cases} \quad (5)$$

Bu sistema giperbolik tipga mansub bo'lib, standart Sen-Venan tenglamalaridan o'ng tomondagi qo'shimcha manba hadlari bilan farqlanadi: $-g \frac{\partial h}{\partial x}$ had kanal tubi qiyaligini, $-\frac{\lambda}{2} u|u|$ had esa ishqalanish kuchini ifodalaydi.

Vektor-matritsa shakli

Sistemani ixcham vektor-matritsa ko'rinishda yozamiz:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{U}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (6)$$

bu yerda:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} H \\ u \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} u & H \\ g & u \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \frac{dh}{dx} - \frac{\lambda}{2} u|u| \end{pmatrix}$$

3. Xarakteristikalar va Riman invariantlari

3.1. Xos qiymatlar va xarakteristik tezliklar

A matritsaning xos qiymatlarini topamiz:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda_c \mathbf{I}) = \begin{vmatrix} u - \lambda_c & H \\ g & u - \lambda_c \end{vmatrix} = (u - \lambda_c)^2 - gH = 0 \quad (7)$$

$$(u - \lambda_c)^2 = gH \Rightarrow \lambda_c = u \pm \sqrt{gH}$$

To'lqin tarqalish tezligini $c = \sqrt{gH}$ deb belgilaymiz. U holda xarakteristik tezliklar:

$$\lambda_1 = u + c, \quad \lambda_2 = u - c \quad (8)$$

Shunga mos ravishda ikkita xarakteristik chiziq oilasi mavjud:

$$C^+: \frac{dx}{dt} = u + c, \quad C^-: \frac{dx}{dt} = u - c \quad (9)$$

3.2. Riman invariantlari

λ_1 va λ_2 uchun mos chap xos vektorlarni topamiz:

$$\mathbf{l}_1 = (g \quad c), \quad \mathbf{l}_2 = (g \quad -c)$$

Bir jinsli hol uchun ($S = 0$) sistema (6) ni chapdan $\mathbf{l}_k^T$ ga ko'paytiramiz. C^+ bo'ylab

($dx/dt = u + c$):

$$g \frac{dH}{dt} + c \frac{du}{dt} = 0$$

$c = \sqrt{gH}$ ekanligidan differensial bog'liqlikni topamiz: $dc = \frac{g}{2c} dH$, ya'ni $g dH = 2c dc$. Demak:

$$2c \frac{dc}{dt} + c \frac{du}{dt} = 0 \Rightarrow c \frac{d}{dt}(u + 2c) = 0$$

$c > 0$ bo'lgani uchun C^+ bo'ylab Riman invarianti:

$$J_+ = u + 2c = \text{const} \quad (10)$$

Xuddi shunday, C^- bo'ylab:

$$J_- = u - 2c = \text{const} \quad (11)$$

3.3. Manba hadining invariantlarga ta'siri

To'liq sistema uchun (5) dan foydalanib, Riman invariantlarining xarakteristikalar bo'ylab o'zgarish qonuniyatini keltirib chiqaramiz:

C^+ bo'ylab ($dx/dt = u + c$):

$$\frac{d}{dt}(u + 2c) = -g \frac{dh}{dx} - \frac{\lambda}{2} u |u| \quad (12)$$

C^- bo'ylab ($dx/dt = u - c$):

$$\frac{d}{dt}(u - 2c) = -g \frac{dh}{dx} - \frac{\lambda}{2} u |u| \quad (13)$$

Bu oddiy differensial tenglamalar sonli integrallash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

4. Boshlang'ich va chegaraviy shartlar

4.1. Boshlang'ich shartlar

$t = 0$ momentda butun $x \in [0, L]$ oraliqda quyidagi boshlang'ich shartlar beriladi:

$$H(x, 0) = H_0(x), \quad u(x, 0) = u_0(x) \quad (14)$$

4.2. Chegaraviy shartlar tahlili

Xarakteristikalar yo'nalishiga qarab, qancha va qanday chegaraviy shart kerakligini aniqlaymiz.

Odatda daryo oqimlari uchun $u < c$ (tinch oqim, Frud soni $Fr = u/c < 1$). Bu holda:

- $x = 0$ da: C^+ chiziq sohaga kiradi ($\lambda_1 > 0$), C^- esa sohadan chiqadi ($\lambda_2 < 0$). Demak, 1 ta chegaraviy shart kerak.
- $x = L$ da: C^- chiziq sohaga kiradi ($\lambda_2 > 0$ bo'lishi mumkin), C^+ esa sohadan chiqadi. Demak, 1 ta chegaraviy shart kerak.

Yuqori chegara ($x = 0$): Odatda suv sarfi yoki suv sathi beriladi:

$$Q(0, t) = Q_{\text{yuq}}(t) \quad \text{yoki} \quad H(0, t) = H_{\text{yuq}}(t) \quad (15)$$

Quyi chegara ($x = L$): Masala shartiga ko'ra, bu yerda «botiq» chegara sharti berilgan. Bu shart odatda suv o'tkazgich yoki vodosliv uchun quyidagicha ifodalanadi:

$$u(L, t)H(L, t) = C [H(L, t)]^{3/2} \Rightarrow u(L, t) = C \sqrt{H(L, t)} \quad (16)$$

bu yerda C — S. Urant konstantasi (o'zgarmas koeffitsient).

4.3. Gidravlik qarshilik parametri

Manba hadidagi λ koeffitsienti [eq:lambda] formula orqali, Manning g'adir-budirlik koeffitsienti n_m esa quyidagicha aniqlanadi:

$$n_m = \frac{g_0 c}{m \cdot l^{\frac{2}{3}}} \quad (17)$$

bu yerda g_0 — erkin tushish tezlanishining sonli qiymati, c — tezlik, m — massa, l — uzunlik birliklari. Amaliy hisoblashlarda n_m konstanta sifatida qabul qilinadi.

5. Sonli yechish algoritmi

5.1. Ichki nuqtalar uchun oshkor ayirmali sxema

Hudud $x \in [0, L]$ ni N ta teng bo'lakka bo'lamiz: $\Delta x = L/N$. Vaqt qadami Δt Kurant-Fridrix-Levi (CFL) shartidan aniqlanadi:

$$\Delta t = \text{CFL} \cdot \frac{\Delta x}{\max_i (|u_i| + c_i)}, \quad \text{CFL} \leq 1 \quad (18)$$

Ichki nuqtalar ($i = 1, 2, \dots, N-1$) uchun Markaziy ayirmalar sxemasi qo'llaniladi:

$$\begin{aligned} \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} + u_i^n \frac{H_{i+1}^n - H_{i-1}^n}{2\Delta x} + H_i^n \frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} &= 0 \\ \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_i^n \frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} + g \frac{H_{i+1}^n - H_{i-1}^n}{2\Delta x} &= -g \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{\lambda_i^n}{2} u_i^n |u_i^n| \end{aligned}$$

bu yerda $\lambda_i^n = 2gn_m^2/(H_i^n)^{4/3}$.

5.2. Chegaraviy nuqtalar uchun xarakteristik sxema

Chegaraviy nuqtalarda aniqlikni oshirish uchun Riman invariantlari usuli qo'llaniladi.

Yuqori chegara ($i = 0$):

Agar yuqori chegarada suv sarfi Q_{yuq} berilgan bo'lsa, C^+ xarakteristika bo'yicha keladigan invariantdan foydalanamiz. (12) tenglamani C^+ xarakteristika bo'ylab diskretlashtiramiz:

$$\frac{(u_0^{n+1} + 2c_0^{n+1}) - (u_1^n + 2c_1^n)}{\Delta \tau} = -g \frac{h_1 - h_0}{\Delta x} - \frac{1}{4} (\lambda_0^{n+1} u_0^{n+1} |u_0^{n+1}| + \lambda_1^n u_1^n |u_1^n|) \quad (21)$$

Bu tenglama va $u_0^{n+1} H_0^{n+1} = Q_{\text{yuq}}^{n+1}$ sharti birgalikda yechilib, u_0^{n+1} va H_0^{n+1} topiladi.

Quyi chegara ($i = N$):

Quyi chegarada botiq shart (16) berilgan. C^- xarakteristika bo'yicha (13) tenglamani diskretlashtiramiz:

$$\frac{(u_N^{n+1} - 2c_N^{n+1}) - (u_{N-1}^n - 2c_{N-1}^n)}{\Delta \tau} = -g \frac{h_N - h_{N-1}}{\Delta x} - \frac{1}{4} (\lambda_N^{n+1} u_N^{n+1} |u_N^{n+1}| + \lambda_{N-1}^n u_{N-1}^n |u_{N-1}^n|) \quad (22)$$

Bu tenglama va $u_N^{n+1} = C \sqrt{H_N^{n+1}}$ sharti birgalikda yechiladi. Bunda $c_N^{n+1} = \sqrt{g H_N^{n+1}}$ ekanligi hisobga olinadi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda ochiq kanallardagi nostatsionar jarayonlarni ifodalovchi Sen-Venan tenglamalari sistemasi uchun chegaraviy shartlarni to'g'ri shakllantirish masalasi kompleks o'rganildi. Matematik tahlil natijasida sistemaning giperbolikligi va xarakteristik tezliklari aniqlanib, Manning

ishqalanish koeffitsienti hamda kanal qiyaligi hisobga olingan holda Riman invariantlarining o'zgarish qonuniyatlari keltirib chiqarildi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, xarakteristikalar usuli nafaqat sistemaning fizik mohiyatini ochib berishda, balki chegaraviy nuqtalarda (xususan, quyi chegara uchun taklif etilgan botiq shartda) sonli yechim barqarorligini ta'minlashda ham asosiy vosita bo'lib xizmat qiladi. Ishlab chiqilgan algoritm va taklif etilgan tavsiyalar gidravlik inshootlarni loyihalashda suv sathi tebranishlarini prognoz qilish va murakkab oqim rejimlarini modellashtirishning aniqligini oshirish imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Saint-Venant, A.J.C. (1871). *Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 73, 147–154.
2. Manning, R. (1891). *On the flow of water in open channels and pipes*. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 20, 161–207.
3. Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing, London.
4. Abbott, M.B. (1979). *Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman, London.
5. Chaudhry, M.H. (2008). *Open-Channel Flow*. Springer, New York.
6. Sturm, T.W. (2010). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
7. Lax, P.D. (1973). *Hyperbolic Systems of Conservation Laws and the Mathematical Theory of Shock Waves*. SIAM, Philadelphia.
8. LeVeque, R.J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press.
9. Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan, New York.

[DOI 10.5281/zenodo.20236850](https://doi.org/10.5281/zenodo.20236850)

Политика Европейского Союза в Центральной Азии и Роль Узбекистана в Формировании Регионального Взаимодействия

Акрам Очилов Омон угли

Магистрант I курса Дипломатической академии при Университете мировой экономики и дипломатии

Аннотация: В представленной статье анализируется политика Европейского союза в Центральной Азии в условиях трансформации системы международных отношений в конце XX — начале XXI века. Особое внимание уделяется роли Узбекистана как одного из ключевых участников регионального взаимодействия. Отмечается, что выгодное геополитическое положение страны, её значительный демографический потенциал, а также активизация внешнеполитического курса в последние годы способствуют укреплению её позиций в качестве важного регионального актора.

В работе рассматриваются основные направления сотрудничества между Европейским союзом и странами Центральной Азии, включая политический диалог, торгово-экономическое партнерство, обеспечение региональной безопасности, устойчивое развитие и интеграционные процессы. Особый акцент сделан на анализе обновлённой Стратегии Европейского союза по Центральной Азии, а также двусторонних механизмов

взаимодействия с Узбекистаном, оказывающих влияние на развитие региональной кооперации и расширение многостороннего сотрудничества.

После обретения независимости государствами Центральной Азии регион трансформировался в самостоятельный геополитический актор, что привлекло внимание ведущих мировых игроков, включая Европейский союз (ЕС). С начала 1990-х годов ЕС последовательно формировал свою стратегию в отношении данного региона, стремясь обеспечить политическую стабильность, стимулировать экономическое развитие и укрепить механизмы международного сотрудничества. Первоначально взаимодействие носило преимущественно декларативный характер, ограничиваясь программами технической помощи и политическими диалогами. Однако в последующие десятилетия подход ЕС претерпел значительную эволюцию, трансформируясь в более комплексную и институционализированную политику.

Актуальность данного исследования обусловлена усилением геостратегического значения Центральной Азии в современной системе международных отношений и возрастанием интереса ЕС к региону в контексте обеспечения энергетической безопасности, развития транспортных и логистических коридоров, а также противодействия новым вызовам и угрозам, таким как радикализация и экстремизм. В этих условиях особый акцент делается на анализе места и роли Республики Узбекистан, которая, благодаря своему стратегическому географическому положению, демографическому потенциалу и активной внешней политике, становится ключевым игроком в формировании устойчивого регионального взаимодействия. В этой связи, проведенное исследование направлено на выявление особенностей и тенденций трансформации внешнеполитической стратегии ЕС в Центральной Азии, а также на определение роли Узбекистана как одного из ключевых факторов, влияющих на формирование устойчивого регионального взаимодействия в новейший период. Особое внимание уделяется анализу институциональных механизмов и инструментов, используемых ЕС для реализации своих целей в регионе, а также оценке эффективности этих механизмов в контексте меняющейся геополитической и экономической обстановки.

Методологическая база данного исследования опирается на комплекс принципов историзма, системного и сравнительного анализа, что позволяет осуществить глубокий и всесторонний анализ динамики отношений между Европейским союзом и странами Центральной Азии в рамках глобальных и региональных трансформационных процессов. В работе применяются как общенаучные методологические инструменты, так и специализированные аналитические подходы, включая историко-генетический анализ и проблемно-хронологическое структурирование материала.

Как было отмечено выше, взаимодействие между Европейским союзом и странами Центральной Азии начало формироваться в контексте обретения государствами региона независимости в начале 1990-х годов. На первоначальном этапе это взаимодействие носило ограниченный и во многом декларативный характер, что было обусловлено как внутренними трансформационными процессами в странах Центральной Азии, так и отсутствием у ЕС четко сформулированной региональной стратегии в тот период.

Ключевым инструментом на начальном этапе сотрудничества стали Соглашения о партнерстве и сотрудничестве, которые были направлены на развитие политического диалога, поддержку рыночных реформ и интеграцию стран региона в мировую экономику. Важно подчеркнуть, что на тот момент ЕС рассматривал Центральную Азию в основном как

периферийное направление своей внешней политики, что определяло ограниченность и декларативный характер начального этапа взаимодействия.

С середины 2000-х годов наблюдается значительное усиление внимания к региону Центральной Азии, обусловленное его стратегическим расположением, богатым ресурсным потенциалом и возрастающей ролью в контексте обеспечения региональной безопасности. В 2007 году был принят основополагающий документ «ЕС и Центральная Азия: стратегия нового партнерства», который закладывает концептуальную основу для развития многоплановых отношений в таких критически важных сферах, как безопасность, энергетика, образование и правовое развитие.

Важно подчеркнуть, что для стран Европейского Союза приоритетное значение имеет продвижение принципов демократического государственного управления, основанного на верховенстве права, защите прав человека, развитии образования и культуры. Эти фундаментальные ценности являются краеугольным камнем в формировании устойчивого и взаимовыгодно партнерства между ЕС и странами Центральной Азии. [1, с. 96]

Принятие Стратегии ЕС по Центральной Азии в 2007 году стало важным шагом в институционализации отношений, обозначив приоритеты взаимодействия в сферах энергетики, безопасности, образования и верховенства права.

На встрече в Люксембурге 19 июня 2017 года министры иностранных дел стран-членов Европейского Союза достигли консенсуса относительно разработки новой внешнеполитической стратегии ЕС для Центральной Азии. Этот документ призван заменить устаревшую и малоэффективную стратегию 2007 года, не соответствующую современным геополитическим реалиям и вызовам. Новая Стратегия ЕС по Центральной Азии представляет собой комплексный политический вклад всех государств-членов ЕС и европейских институтов в углубление стратегического партнерства и укрепление двусторонних отношений с государствами региона. В условиях усиливающейся конкуренции на международной арене и необходимости эффективного использования имеющихся ресурсов, только через консолидированное сотрудничество можно адекватно решать возникающие проблемы и максимально эффективно использовать потенциальные возможности, представленные регионами Центральной Азии.[2]

В обновленной Стратегии ЕС 2019 года был зафиксирован переход к более прагматическому и дифференцированному подходу, учитывающему уникальные особенности каждой страны региона. Документ акцентирует внимание на устойчивости, процветании и региональном сотрудничестве как основополагающих векторах взаимодействия, что отражает стремление ЕС к более целенаправленному и эффективному управлению интеграционными процессами.

А принятая в 2023 г. «дорожная карта» ЕС по отношению в ЦА, поставила своей целью углубление отношений, как на двустороннем уровне между ЕС и отдельными центральноазиатскими республиками, так и на многостороннем – между объединением и регионом. На протяжении последних лет регулярно проводились министерские встречи, призванные содействовать диалогу на высшем уровне. Существуют все основания полагать, что такая политика продиктована необходимостью расширения внешнеэкономических контактов и укрепления позиций Евросоюза в международных отношениях, в том числе – с целью обеспечения стратегической автономии.[5]

Необходимо выделить Республику Узбекистан как ключевого актора регионального взаимодействия. Республика Узбекистан занимает центральное место в регионе как в географическом, так и в политико-экономическом отношении. С 2016 г. внешняя политика страны характеризуется активизацией регионального сотрудничества, улучшением

отношений с соседними государствами и открытостью к международному диалогу. Это создало качественно новые условия для взаимодействия с ЕС.

Узбекистан на сегодняшний день выступает не только инициатором региональных диалогов, но и активным участником интеграционных процессов, а также связующим звеном между странами Центральной Азии.

Особое значение в контексте рассматриваемой темы имеет двустороннее сотрудничество ЕС и Узбекистана, которое в последние годы демонстрирует устойчивую положительную динамику. Так, одним из ключевых направлений является развитие договорно-правовой базы. Ведется работа по заключению Соглашения о расширенном партнёрстве и сотрудничестве (ЕРСА), направленного на углубление взаимодействия в различных сферах.

За последний период, Республика Узбекистан занимает ключевое место в данной системе, выступая важным фактором развития регионального взаимодействия. Активизация внешней политики страны, её инициативы в области регионального сотрудничества и углубление отношений с ЕС способствуют формированию устойчивой и взаимовыгодной модели взаимодействия. А перспективы дальнейшего развития сотрудничества ЕС и Узбекистана связаны с углублением экономических связей, расширением политического диалога и совместным решением глобальных и региональных проблем.

ЕС и Центральная Азия переходят от декларативного взаимодействия к стратегическому партнёрству, углубляя политический диалог, расширяя институциональные механизмы и увеличивая практическое сотрудничество. Ключевым фактором стало изменение геополитической обстановки, где регион приобретает важность в глобальной конкуренции. ЕС стремится укрепить свое присутствие, предлагая модели сотрудничества, основанные на устойчивом развитии, транспарентности и верховенстве права.

Существенную роль в наблюдаемом сближении играет и развитие транспортно-логистических маршрутов, соединяющих Европу и Азию. Инициативы по развитию межрегиональной взаимосвязанности способствуют усилению экономических связей и повышению значимости Центральной Азии как транзитного региона.

Кроме того, ЕС активизирует взаимодействие в сфере «мягкой силы», включая образовательные программы, поддержку гражданского общества и реформ государственного управления. Это позволяет формировать долгосрочные основы партнёрства и укреплять институциональную устойчивость стран региона.

Анализируя современное взаимодействие ЕС и стран Центральной Азии, можно указать на широкий спектр направлений, среди которых особое значение имеют:

Политический диалог и безопасность: ЕС активизировал участие в развитии механизмов региональной безопасности, включая борьбу с транснациональными угрозами, такими как терроризм, экстремизм и незаконный оборот наркотиков. Также важным направлением является содействие укреплению правового государства и демократических институтов.

Действительно, немаловажным фактором сотрудничества Европы и стран Центральной Азии является международная безопасность, которая подразумевает скоординированную борьбу с терроризмом, радикализмом, исламским фундаментализмом и наркотрафиком. Страны Центральной Азии оказались под прямой террористической угрозой, исходящей из Афганистана. [1, с. 98]

Экономическое сотрудничество и инвестиции: ЕС усилил свое присутствие в качестве одного из крупнейших инвесторов в регионе, способствуя развитию частного сектора, модернизации инфраструктуры и диверсификации экономик стран Центральной Азии.

Особое внимание уделяется улучшению инвестиционного климата и поддержке малого и среднего бизнеса.

Кроме того, ЕС может стать перспективным партнером для стран Центральной Азии с точки зрения создания рабочих мест с целью уменьшения трудовой миграции или содействия расширению местной трансграничной торговли. [1, с. 98]

Энергетика и устойчивое развитие: сотрудничество ЕС в энергетической сфере всецело направлено на диверсификацию источников энергоресурсов, развитие возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности. Важным аспектом является также реализация экологических инициатив и адаптация к изменениям климата.

Транспорт и взаимосвязанность: развитие транспортных коридоров, включая Транскаспийский международный транспортный маршрут, становится одним из приоритетов взаимодействия. Это способствует интеграции региона в глобальные цепочки поставок и укреплению экономических связей с Европой.

Особо отметим, что немаловажным фактором, объединяющим в сотрудничестве Европейский Союз и Центральную Азию, является транспортная и логистическая составляющая и развитая инфраструктура. Здесь потенциал сотрудничества сторон огромен и взаимовыгоден. Во-первых, европейские предприятия готовы помочь с развитием инфраструктуры в регионе, что послужит толчком по развитию уровня отношений в сфере торговли на высокий и взаимовыгодный уровень.[4]

Во-вторых, в реализации амбициозного проекта «Один пояс, один путь», предусмотрено связать Китай с Европой, при этом связующим звеном станет Центральная Азия, чей транзитный потенциал положительно скажется на реализации цепочки «Китай-Центральная Азия-Европа». Находящиеся в самом центре Евразийского континента центрально-азиатские государства готовы рассмотреть новые проекты, что упростит ведение мировой торговли и доступ на мировые рынки стран-участникам глобального экономического проекта. Тактически это может открыть путь к «мягкому регионализму» асеановского типа. [1, с. 98]

Образование и гуманитарное сотрудничество: ЕС активно поддерживает образовательные и научные программы, направленные на развитие человеческого капитала, академическую мобильность и обмен знаниями. Это способствует формированию устойчивых связей между обществами и укреплению взаимопонимания.

Стоит согласиться что самый ценный вклад, который Европа может внести в развитие Центральной Азии, лежит в сфере образования. ЕС активно занимается высшим образованием в рамках всемирной программы «Erasmus+». Существует также региональная инициатива ЕС в области образования, ориентированная на Центральную Азию. Образование считается приоритетным сектором в сотрудничестве в области развития с Казахстаном, Кыргызстаном, Таджикистаном и Туркменистаном. [1, с. 98]

Прорывом во взаимоотношении ЕС и Центральной Азией по праву необходимо указать прошедший 4 апреля 2025 г. первый саммит Европейского союза и стран Центральной Азии (Саммит ЕС–ЦА) в г. Самарканде (Узбекистан), под названием «Инвестируя в будущее». [6] В саммите приняли участие председатель Европейского совета Антониу Кошту, глава Европейской комиссии Урсула фон дер Ляйен, а также представители пяти центральноазиатских республик – Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана. Проведение саммита стало важным шагом на пути к укреплению отношений между Евросоюзом и странами Центральной Азии, последовавшим после обновления

стратегии ЕС в 2019 г. в отношении региона [3, с. 68-80] и принятия в 2023 г. «дорожной карты» по углублению сотрудничества. [7]

В повестку дня саммита вошли такие важные темы, как вопросы многостороннего и регионального сотрудничества, трансграничные вызовы в области безопасности, экономические связи, торговля и инвестиции, взаимодействие по климатическим проблемам, энергоресурсам, вопросам цифровой подключенности, а также по проблематике прав человека. [10]

Принятая по итогам саммита совместная декларация установила повышение уровня взаимодействия между Европейским союзом и странами Центральной Азии до стратегического партнерства, [8] что свидетельствует о намерении сторон углублять политический диалог и расширять сферы сотрудничества. Документ также очертил ключевые направления дальнейшего взаимодействия, в частности в области обеспечения региональной стабильности, безопасности и устойчивого развития, что отразило стремление ЕС усилить свое присутствие в стратегически важном регионе в условиях растущей международной турбулентности. [5]

Среди приоритетных сфер сотрудничества, указанных в декларации, прежде всего следует рассмотреть вопросы безопасности, которые имеют особое значение для Брюсселя в контексте реализации его региональной стратегии, нацеленной на укрепление стабильности и противодействие внешним вызовам, таким как терроризм и экстремизм. Участники саммита подтвердили свое обязательство воздерживаться от применения силы в международных отношениях, соблюдать положения Устава ООН о суверенитете и территориальной целостности всех государств, а также подчеркнули приверженность к мирному урегулированию конфликтов. Отдельное внимание в документе уделено проблеме терроризма, обеспечению безопасности границ, борьбе с наркотрафиком и торговлей людьми. Кроме того, в декларации упомянута проблема Афганистана, нестабильность в котором создает существенные риски как для соседних центральноазиатских стран, так и для Евросоюза. В частности, подчеркивалась необходимость превращения Афганистана в «безопасное, стабильное и процветающее государство с инклюзивным правительством и системами управления, уважающими права человека и основные свободы всех своих граждан, включая женщин, девочек, лиц, принадлежащих к этническим и религиозным группам и меньшинствам». [5]

Декларация определила одной из ключевых областей экономического сотрудничества между Евросоюзом и Центральной Азией критические сырьевые материалы, [9] а также развитие транспортной инфраструктуры, прежде всего Транскаспийского транспортного коридора.

Несмотря на позитивную динамику, отношения между ЕС и странами Центральной Азии сталкиваются с рядом ограничений. К ним относятся различия в политических системах, уровень экономического развития, а также конкуренция со стороны других внешних акторов.

Кроме того, сохраняются институциональные и инфраструктурные барьеры, затрудняющие реализацию совместных проектов. Ограниченное финансирование и различия в приоритетах сторон также могут сдерживать углубление сотрудничества.

Тем не менее перспективы развития партнерства остаются значительными. Усиление взаимной заинтересованности, развитие новых форматов взаимодействия и адаптация

политики ЕС к региональной специфике создают предпосылки для дальнейшей институционализации стратегического партнёрства.

В долгосрочной перспективе ключевым фактором успеха может стать способность сторон выработать сбалансированную модель сотрудничества, учитывающую интересы всех участников и направленную на обеспечение устойчивого развития региона.

Исследование показало, что отношения между ЕС и Центральной Азией развиваются постепенно, отражая как внутренние изменения в регионах, так и глобальные тенденции трансформации международных связей. На первых порах взаимодействие было ограничено техническими и консультативными аспектами. Однако с укреплением государственности и внешнеполитической самостоятельности стран Центральной Азии сотрудничество стало более системным и многогранным, вписываясь в глобальные процессы перераспределения влияния и формирования новых центров силы.

Политика ЕС в отношении Центральной Азии значительно изменилась: из второстепенного направления она превратилась в важный элемент внешнеполитической стратегии. Это связано с геополитическим положением региона, его ресурсами и транзитным потенциалом. ЕС усиливает внимание через институционализацию взаимодействия, создание устойчивых механизмов диалога и разработку стратегических документов, определяющих приоритеты сотрудничества. Центральная Азия теперь рассматривается не только как объект политики, но и как партнер в решении региональных и глобальных проблем.

Современный этап сотрудничества между Евросоюзом и странами Центральной Азии отмечен значительным расширением повестки взаимодействия. В отличие от прошлого, когда акцент делался на демократизации и экономических реформах, сегодня сотрудничество охватывает множество направлений. Среди них — региональная и транснациональная безопасность, включая борьбу с терроризмом и трансграничной преступностью; углубление торгово-экономических связей и инвестиционное сотрудничество; энергетическое партнерство с акцентом на диверсификацию источников и маршрутов поставок; развитие транспортной инфраструктуры; гуманитарное взаимодействие, которое охватывает образование, науку и культурные обмены. Эта многослойность указывает на переход к более комплексной модели партнерства.

Несмотря на достигнутые успехи, полноценное стратегическое партнерство между ЕС и Центральной Азией все еще находится в стадии формирования. Существующие механизмы взаимодействия нуждаются в наполнении практическим содержанием и повышении эффективности реализации совместных проектов. Важно также учитывать различия в приоритетах, уровнях экономического развития и политических подходах сторон. Углубление сотрудничества требует не только расширения формальных рамок взаимодействия, но и укрепления взаимного доверия, развития институциональной устойчивости и адаптации партнерства к меняющимся условиям международного окружения.

В результате проведенного научного исследования взаимоотношений ЕС и Центральной Азии, представленного в статье, представляется целесообразным сформулировать следующие **рекомендации**, направленные на углубление и повышение эффективности межрегионального взаимодействия:

- Для укрепления взаимного доверия и предсказуемости сотрудничества важно углублять политический диалог на всех уровнях — двустороннем, региональном и межрегиональном. Особое внимание следует уделить регулярности встреч на высшем уровне, расширению парламентского и экспертного диалога, а также развитию механизмов мягкой дипломатии. Это позволит оперативно реагировать на вызовы и формировать долгосрочную повестку взаимодействия.

- Развитие транспортной и логистической взаимосвязанности является основой экономического партнёрства. Важно стимулировать инфраструктурные проекты, направленные на создание устойчивых транзитных коридоров между Европой и Азией, модернизацию транспортных сетей и упрощение процедур пересечения границ. Это будет способствовать росту торговли, инвестиционной активности и интеграции стран Центральной Азии в глобальные цепочки поставок.
- Необходимо формировать и укреплять механизмы многостороннего взаимодействия с участием региональных и международных организаций. Это требует координации усилий между различными институциональными форматами, предотвращения дублирования инициатив и повышения эффективности использования ресурсов. Особое значение имеет развитие платформ для диалога по вопросам безопасности, устойчивого развития, экологии и управления трансграничными рисками.
- Обеспечение баланса интересов сторон должно основываться на принципах взаимной выгоды, равноправия и долгосрочного сотрудничества. Важно учитывать различия в социально-экономическом развитии стран региона, их национальные приоритеты и чувствительность к вопросам суверенитета. Для этого следует адаптировать инструменты сотрудничества, повышать гибкость программ и усиливать практическую направленность совместных инициатив.
- Активное сотрудничество в сфере устойчивого развития, включая «зелёную» энергетику, управление водными ресурсами и экологическую безопасность, позволит отвечать на глобальные климатические вызовы и создавать новые точки роста для экономик стран Центральной Азии. Это также будет способствовать внедрению инновационных технологий и стандартов.
- Расширение гуманитарного и образовательного взаимодействия является основой для формирования долгосрочных связей между обществами. Поддержка академической мобильности, научных обменов и совместных образовательных программ будет способствовать подготовке квалифицированных кадров, развитию человеческого капитала и укреплению взаимопонимания между регионами.

Список литературы:

1. Михайленко В.И., Сухроб Рустами. На пути к новой стратегии Европейского Союза для Центральной Азии. // История и современное мировоззрение, Т. 1, № 3, 2019, с. 96, 98.
2. Панелла Р., Боонстра Й. Три причины, почему ЕС имеет значения для ЦА. URL: <http://voicesoncentralasia.org/threereasons-why-the-eu-matters-to-central-asia/>
3. Прохоренко И.Л. Новая стратегия Европейского союза в Центральной Азии: возможности и пределы “мягкой силы” // Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН. – 2019. – № 4. – С. 68-80.
4. Пуц К. Центральная Азия «чрезвычайно важна» для Европейского Союза. URL: <https://thediplomat.com/2015/12/central-asia-extremely-important-to-the-european-union/>
5. Столярова У.А. Первый Саммит ЕС – Центральная Азия: ключевые итоги. - <https://www.imemo.ru/publications/policy-briefs/text/perviy-sammit-es-tsentrallynaya-aziya-klyuchevie-itogi>
6. First EU-Central Asia summit, 4 April 2025 // European Council. 04.04.2025. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/meetings/international-summit/2025/04/04/>
7. Joint Roadmap for Deepening Ties between the EU and Central Asia // Council of the European Union. Luxembourg, 23 October 2023. [Electronic resource]. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14587-2023-INIT/en/pdf>

-
8. Joint Declaration following the First European Union-Central Asia Summit // Council of the European Union. Brussels, 3 April 2025. [Electronic resource]. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-7745-2025-REV-1/en/pdf>
 9. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. Official Journal of the European Union. 11 April 2024. [Electronic resource]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1252&qid=1720020986785>
 10. Strategic partnership, transport corridors, critical minerals and more – Samarkand summit highlights // Kun.uz. 09.04.2025. URL: <https://kun.uz/en/85701869>



International Scientific and Practical Conference

INNOVATIVE APPROACHES TO WATER RESOURCE
MANAGEMENT IN ARID REGIONS IN THE CONTEXT OF
CLIMATE CHANGE

Bosishga ruxsat etildi: 13.05.2026-yil. Bichimi 70x100 1/16, Times New Roman garniturada
raqamli bosma usulida bosildi. Shartli bosma tabog'i: 17,5. Adadi: 100.

Noble Print MChJ bosmaxonasida chop etildi.
100194, Toshkent shahri, Yunusobod-11, 62-uy.