

ISSN (Print) 2616-7034
ISSN (Online) 2663-130X

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

БИОЛОГИЯЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР сериясы

BIOSCIENCE Series

Серия БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

№3 (152)/ 2025

2010 жылдан бастап шығады

Founded in 2010

Издается с 2010 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2025

Astana, 2025

Бас редактор:

Р.І. Берсімбаев,

ҚР ҰҒА академигі, б.ғ.д, проф., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Бас редактордың орынбасары

Ж.К. Масалимов, *б.ғ.к., доцент, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан*

Редакция алқасы:

Акильжанова А.Р.	м.ғ.д., PhD, Назарбаев университеті, Астана (Қазақстан)
Аликулов З.А.	б.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана (Қазақстан)
Аскарова Ш.Н.	б.ғ.к., PhD, Назарбаев университеті, Астана (Қазақстан)
Ау У.	PhD, проф., Техас университеті, Техас (АҚШ)
Бисенбаев А.К.	б.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы (Қазақстан)
Здунек-Застока Э.	PhD, проф., Варшава жаратылыстану ғылымдары университеті, Варшава (Польша)
Изотти А.	PhD, проф., Генуя университеті, Генуя (Италия)
Ильдербаев О.З.	м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана (Қазақстан)
Коломиец М.	PhD, проф., Техас университеті, Техас (АҚШ)
Константинов Ю.М.	б.ғ.д., проф., Иркутск мемлекеттік университеті, Иркутск (Ресей)
Курманбаева А.Б.	PhD, оқытушы-зерттеуші, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана (Қазақстан)
Позо М.Х.	PhD, Испания ұлттық зерттеу кеңесінің Zaidin тәжірибелік станциясы, Гранада (Испания)
Рубцов Н.	б.ғ.д., проф., Цитология және генетика институты, Новосібір (Ресей)
Саги М.	PhD, проф., Бен Гурион атындағы Негев университеті, Беэр-Шева (Израиль)
Сарбасов Д.Д.	PhD, проф., Назарбаев университеті, Астана (Қазақстан)
Тарлыков П.В.	PhD, зертхана меңгерушісі, Ұлттық биотехнология орталығы, Астана (Қазақстан)
Халилов Р.И.	ф.-м.ғ.д., Баку мемлекеттік университеті, Баку (Әзірбайжан)

Редакцияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
E-mail: eurjourbio@enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы. БИОЛОГИЯЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР сериясы
Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"
Мерзімділігі: жылына 4 рет
Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген
02.02.2021ж. № KZ11VPY00031938 қайта есепке қою туралы куәлігі
Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Сайт: <http://bulbio.enu.kz>

Editor-in-Chief:

R.I. Bersimbaev,

*Academician of NAS RK, Doctor of Biological Sciences, Prof.,
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

Deputy Editor-in-Chief:

Zh.K. Masalimov, *Candidate of Biological Sciences, Associate professor,
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

Editorial board

Akilzhanova A.R.	Doctor of Medical Sciences, PhD, Nazarbayev University, Astana (Kazakhstan)
Alikulov Z.A.	Prof., Can. of Biological Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana (Kazakhstan)
Askarova Sh.N.	PhD, Can. of Biological Sciences, Nazarbayev University, Astana (Kazakhstan)
Au W.	PhD, Prof., University of Texas, Texas (USA)
Bisenbayev A.K.	Doctor of Biological Sciences, Prof., Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty (Kazakhstan)
Zdunek-Zastocka E.	PhD, Prof, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw (Poland)
Izzotti A.	PhD, Prof., University of Genoa, Genoa (Italy)
Ilderbayev O.Z.	Doctor of Medical Sciences, Prof., L.N. Gumilyov ENU, Astana (Kazakhstan)
Kolomic M.	PhD, Prof., University of Texas, Texas (USA)
Konstantinov Yu.M.	Doctor of Biological Sciences, Prof., Irkutsk State University, Irkutsk (Russia)
Kurmanbayeva A.B.	PhD, teacher-researcher, L.N. Gumilyov ENU, Astana (Kazakhstan)
Pozo M.J.	PhD, Zaidin Experimental Station of the Spanish National Research Council, Granada (Spain)
Rubtsov N.	Doctor of Biological Sciences, Prof., Institute of Cytology and Genetics, Novosibirsk (Russia)
Sagi M.	PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Beer Sheva (Israel)
Sarbassov D.D.	PhD, Prof., Nazarbayev University, Astana (Kazakhstan)
Tarlykov P.V.	PhD, Head of the Laboratory, National Center for Biotechnology, Astana (Kazakhstan)
Khalilov R.I.	Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Baku State University, Baku (Azerbaijan)

Editorial address: **2 Satpayev str., of., L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Astana, Kazakhstan, 010008**
E-mail: **eurjourbio@enu.kz**

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. BIOSCIENCE Series

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan Rediscount certificate
№ KZ11VPY00031938 from 02.02.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhimukan str., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
010008

Website: <http://bulbio.enu.kz>

Главный редактор:

Р.И. Берсимбай,

профессор, д.б.н., академик НАН РК, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Зам. главного редактора

Ж.К. Масалимов, к.б.н., доцент, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия:

Акильжанова А.Р.	д.м.н., PhD, Назарбаев Университет, Астана (Казахстан)
Аликулов З.А.	к.б.н., проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана (Казахстан)
Аскарова Ш.Н.	к.б.н., PhD, Назарбаев Университет, Астана (Казахстан)
Ау У.	PhD, проф., Техасский университет, Техас (США)
Бисенбаев А.К.	д.б.н., проф., академик НАН РК, КазНУ имени аль-Фараби, Алматы (Казахстан)
Здунек-Застока Э.	PhD, проф., Варшавский университет естественных наук, Варшава (Польша)
Изотти А.	PhD, проф., Университет Генуя, Генуя (Италия)
Ильдербаев О.З.	д.м.н., проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана (Казахстан)
Коломиец М.	PhD, профессор, Техасский университет, Техас (США)
Константинов Ю.М.	д.б.н., проф., Иркутский государственный университет, Иркутск (Россия)
Курманбаева А.Б.	PhD, преподаватель-исследователь, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана (Казахстан)
Позо М.Х.	PhD, Экспериментальная станция Zaidin Испанского национального исследовательского совета, Гранада (Испания)
Рубцов Н.	д.б.н., профессор, Институт цитологии и генетики, Новосибирск (Россия)
Саги М.	PhD, профессор, Университет имени Бен-Гуриона в Негеве, Беэр-Шева (Израиль)
Сарбасов Д.Д.	PhD, профессор, Назарбаев Университет, Астана (Казахстан)
Тарлыков П.В.	PhD, заведующий лабораторией, Национальный центр биотехнологии, Астана (Казахстан)
Халилов Р.И.	д.ф.-м.н., Бакинский государственный университет, Баку (Азербайджан)

Адрес редакции: **010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,**
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
E-mail: eurjourbio@enu.kz

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ
Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»
Периодичность: 4 раза в год
Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Свидетельство о постановке на переучет № KZ11VPY00031938 от 02.02.2021 г.
Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Сайт: <http://bulbio.enu.kz>

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

А.Б. Сабирова, А.Т. Айтказина, А.А. Кусаинова, О.В. Булгакова, Р.И. Берсімбай, А.А. Арипова Бронх демікпесі бар науқастардың қан сарысуынан азот оксидінің деңгейін зерттеу..... A. Sabirova, A. Aitkazina, A. Kussainova, O. Bulgakova, R. Bersimbaev, A. Aripova Study of nitric oxide levels in the serum of patients with bronchial asthma..... А.Б. Сабирова, А.Т. Айтказина, А.А. Кусаинова, О.В. Булгакова, Р.И. Берсімбаев, А.А. Арипова Исследование уровня оксида азота в сыворотке крови у пациентов с бронхиальной астмой	7
О.З. Ильдербаев, К.В. Мутиг, Д.Е. Узбекиов, Г.М. Жармаханова, Г.О. Ильдербаева, Ж.П. Сембаева Стрептозотоциндік диабеттің ағымына иондаушы сәуленің әсерін егеуқұйрықтардың иммунологиялық және биохимиялық жағдайын талдау арқылы зерттеу..... O.Z. Ilderbayev, K.V. Mutig, D.E. Uzbekov, G.M. Zharmakhanova, G.O. Ilderbayeva, Zh.P. Sembayeva Investigation of the effect of ionizing radiation on the course of streptozotocin-induced diabetes through the analysis of immunological and biochemical status in rats..... О.З. Ильдербаев, К.В. Мутиг, Д.Е. Узбекиов, Г.М. Жармаханова, Г.О. Ильдербаева, Ж.П. Сембаева Изучение влияния ионизирующего излучения на течение стрептозотоцинового диабета путем анализа иммунологического и биохимического состояния крыс.....	20
А.А. Рахымжан, А.Н. Аралбаева, Ш. Гунер, З.Д. Душимова, Т.А. Ахаева, А.М. Сейталиева Мезентериялды және коронарлық артерияны зерттеуде көпфотонды интравитальді микроскопияны қолдануын енгізу..... A.A. Rakhymzhan, A.N. Aralbaeva, S. Guner, Z.D. Dushimova, T.A. Akhayeva, A.M. Seitaliyeva Implementation of multiphoton intravital microscopy in mesenteric and coronary artery research А.А. Рахымжан, А.Н. Аралбаева, Ш. Гунер, З.Д. Душимова, Т.А. Ахаева, А.М. Сейталиева Внедрение мультифотонной интравитальной микроскопии для исследования брыжеечной и коронарной артерии.....	39
Д. Абдильманов, Г.К. Датхабаева, М. Жолдасова, А.М. Кустубаева Ассоциативті оқытудың жас ерекшеліктеріне байланысты психофизиологиялық ерекше- ліктері..... D. Abdilmanov, G.K. Datkhbayeva, M. Zholdassova, A.M. Kustubayeva Age-related psychophysiological parameters of associative learning with reinforcement..... Д. Абдильманов, Г.К. Датхабаева, М. Жолдасова, А.М. Кустубаева Возрастные психофизиологические особенности ассоциативного научения с подкреп- лением.....	56
Б.Т. Байқоныс, Д.Е. Құрманғали, Туякова А.К, Ж.М. Бекшин, Г.К. Абитаева Пробиотикалық препараттың дисбактериоз жағдайындағы терапиялық белсенділігін зерттеу.....	

<i>B.T. Baikonys, D.E. Kurmangali, A.K. Tuyakova, Zh.M. Bekshin, G.K. Abitayeva</i> Study of the therapeutic activity of a probiotic preparation under conditions of dysbiosis.....	
<i>Б.Т. Байконыс, Д.Е. Курмангали, А.К. Туякова, Ж.М. Бекшин, Г.К. Абитаева</i> Изучение терапевтической активности пробиотического препарата при дисбактериозе	76
<i>А.Ж. Жаксылыков, К.А. Дюсембаев, С.К. Наекова, Ж. Нурбекова, Ш.Е. Арыстанова, А.К. Оспанова, В.С. Киян, Ж.А. Тулегенова</i> Trichoderma harzianum саңырауқұлағының Cytospora туысына жататын саңырауқұлақтарға қатысты антагонистік белсенділік және изоляттардың филогенетикалық талдауы...	
<i>A.Zh. Zhaxylykov, K.A. Dyussebayev, S.K. Nayekova, Zh. Nurbekova, Sh.E. Arystanova, A.K. Ospanova, V.S. Kiyan, Z.A. Tulegenova</i> Antagonistic activity of Trichoderma harzianum against Cytospora fungi and phylogenetic analysis of isolates.....	
<i>А.Ж. Жаксылыков, К.А. Дюсембаев, С.К. Наекова, Ж. Нурбекова, Ш.Е. Арыстанова, А.К. Оспанова, В.С. Киян, Ж.А. Тулегенова</i> Антагонистическая активность Trichoderma harzianum в отношении грибов рода Cytospora и филогенетический анализ изолятов.....	87
<i>Г.Ж. Султангазина, А.Н. Куприянов, О.А. Куприянов, С.Б. Куанышбаев, А.У. Ыскак, В.Н. Чашков</i> Флористические особенности озер Костанайской области.....	
<i>G.Zh. Sultangazina, A.N. Kupriyanov, O.A. Kupriyanov, S.B. Kuanyshbaev, A.U. Yshak, V.N. Chashkov</i> Floristic features of the Kostanay region's lakes.....	
<i>Г.Ж. Сұлтанғазина, А.Н. Куприянов, О.А. Куприянов, С.Б. Куанышбаев, А.У. Ысқақ, В.Н. Чашков</i> Қостанай облысы көлдерінің флористикалық ерекшеліктері.....	103
<i>А.С. Есжанова, А. Абдухадыр, В.А. Масалова, Г.Т. Ситпаева, Н.Е. Зверев, В.Г. Эпиктетов, Б.К. Билибаева, И.В. Бабай, С.В. Набиева, К.С. Избастина</i> Ұлытау өңірінің бөгде ағаш өсімдіктері: инвазиялық әлеует және натурализация жолдары	
<i>A.S. Yeszhanova, A. Abdukhadyr, V.A. Masalova, G.T. Sitpayeva, N.E. Zverev, V.G. Epiktetov, B.K. Bilibaeva, I.V. Babay, S.V. Nabieva, K.S. Izbastina</i> Alien woody plants in the Ulytau region: invasive potential and naturalization pathways.....	
<i>А.С. Есжанова, А. Абдухадыр, В.А. Масалова, Г.Т. Ситпаева, Н.Е. Зверев, В.Г. Эпиктетов, Б.К. Билибаева, И.В. Бабай, С.В. Набиева, К.С. Избастина</i> Чужеродные древесные растения Улытауского региона: инвазионный потенциал и пути натурализации.....	123
<i>И.А. Боздар, Р. Ахмед, А.Б. Чачар, Р.Н. Малано, Х. Магси, А.А. Махесар</i> Теңіз суының жағалаудағы агроэкожүйелерге енуінің биологиялық және әлеуметтік-экономикалық салдары.....	
<i>I.A. Bozdar, R. Ahmed, A.B. Chachar, R.N. Malano, H. Magsi, A.A. Mahesar</i> Biological and socioeconomic implications of seawater intrusion on coastal agroecosystems	
<i>И.А. Боздар, Р. Ахмед, А.Б. Чачар, Р.Н. Малано, Х. Магси, А.А. Махесар</i> Биологические и социально-экономические последствия интрузий морской воды в прибрежные агроэкосистемы.....	147



IRSTI 34.15.25
Research article

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-7-19>

Study of nitric oxide levels in the serum of patients with bronchial asthma

A. Sabirova¹, A. Aitkazina², A. Kussainova¹, O. Bulgakova¹, R. Bersimbaev¹,
A. Aripova^{*1}

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²City Multidisciplinary Hospital No. 2, Astana, Kazakhstan

Abstract. This preliminary research article is dedicated to the determination of nitric oxide (NO) levels in the serum of patients with bronchial asthma (BA). Nitric oxide plays an important role in the pathogenesis of bronchial asthma, as it contributes to bronchoconstriction and stimulates the production of inflammatory mediators, thereby exacerbating the disease. The study included 41 participants, comprising patients with BA of varying disease control categories (controlled, partially controlled, and uncontrolled asthma) as well as individuals without a diagnosis of BA (control group). The NO level was measured using the “Nitric Oxide (total)” assay kit (ADI-917-020) from Enzo Life Sciences Inc. (USA). The results demonstrated that serum NO levels in patients with BA were significantly elevated, approximately 1.34 times compared to the control group ($p=0.001$). Additionally, the concentration of nitric oxide was analyzed according to sex and age. A statistically significant difference was found between women older than 65 years and those younger ($p=0.0347$). When comparing serum, NO concentrations between partially controlled and uncontrolled asthma groups with the control group, NO levels were elevated by 1.31 times and 1.42 times, respectively ($p=0.0355$ and $p=0.0033$). ROC analysis of nitric oxide levels for the diagnosis of bronchial asthma revealed acceptable diagnostic accuracy ($AUC=0.6932$; $p=0.013$). Thus, the determination of nitric oxide concentration in the serum of patients with bronchial asthma may play an important role in diagnosis and could serve as a potential biomarker of the disease.

Keywords: Inflammation, Bronchial asthma, Nitric oxide, Serum biomarker, Serum nitric oxide levels

Introduction

Bronchial asthma (BA) is currently considered one of the most prevalent and clinically significant chronic respiratory diseases. According to the World Health Organization, over 300 million people worldwide are affected by bronchial asthma, and its global prevalence continues to rise steadily each year. These trends underscore the growing medical and social relevance of this condition [1,2].

Received: 29.07.2025. Accepted: 30.09.2025. Available online: 30.09.2025.

*Corresponding author: aripova001@gmail.com

BA is a disease characterized by chronic airway inflammation and is primarily driven by immunological mechanisms. In its pathogenesis, inflammatory mediators – particularly molecules such as nitric oxide (NO) – play a crucial role. Nitric oxide is a key biological molecule that actively participates in airway inflammation, influencing numerous cellular processes and contributing to various physiological and pathophysiological functions in the body. It is endogenously synthesized by nitric oxide synthase (NOS) enzymes and plays an important role in airway dilation, regulation of blood circulation, and intercellular signaling [3–4].

During the inflammatory process in bronchial asthma, the production of nitric oxide (NO) is enhanced, leading to elevated levels in both the blood and airways. The use of biomarkers allows for accurate assessment of disease progression, effective treatment planning, and timely monitoring of the patient's condition – key priorities in clinical practice. Measuring nitric oxide levels in blood serum provides deeper insight into the pathogenesis of bronchial asthma and supports the development of personalized therapeutic strategies. Therefore, investigating the molecular-genetic and immunological aspects of bronchial asthma remains highly relevant.

This study aimed to determine the concentration of nitric oxide (NO) in the blood serum of patients diagnosed with bronchial asthma.

Materials and research methods

Collection of Research Materials

The study included 33 patients diagnosed with bronchial asthma (22 women and 11 men, aged 36 to 90 years) and 8 healthy individuals who served as the control group (Table 1). All participants had been residing in Kazakhstan for at least the past five years. The patients received treatment in the pulmonology department of City Hospital No. 2 in Astana. The diagnosis was established in accordance with the Global Initiative for Asthma (GINA) guidelines. Additionally, the "Nijmegen Questionnaire" and "Asthma Control Questionnaire" were administered.

The control group consisted of healthy volunteers with no history of neurological, autoimmune, allergic, or chronic diseases; no diabetes; no signs of inflammation; and no recent episodes of hyperthermia or heatstroke within the past 2–3 weeks.

Peripheral blood samples (9 mL) were collected in EDTA-K2 tubes with informed consent from the participants and ethical approval. The samples were processed at the Molecular Genetics Laboratory of the Institute of Cellular Biology and Biotechnology, L.N. Gumilyov Eurasian National University.

The patients were categorized into three groups:

Controlled BA – no or rare symptoms;

Partially controlled BA – occasional symptoms;

Uncontrolled BA – persistent symptoms and poor treatment response.

Separation of blood components

Whole blood was stored at +4°C for 4 hours, after which the plasma was separated by centrifugation at 3000g for 10 minutes. The leukocyte-free plasma was then stored at –80°C until analysis.

Table 1

Characteristics of the samples included in the study

Parameters	Control group	Patients with diagnosed BA	p-value
Number of participants	8	33	0,1374
Mean age	48	63	0,1600
Sex (female/male)	3/5	22/11	0,7927
Controlled BA	-	7	0,2593
Partially controlled BA	-	13	
Uncontrolled BA	-	13	

Determination of nitric oxide (NO) concentration

Plasma samples were diluted with reaction buffer at ratios ranging from 1:2 to 1:20 and filtered using a 10,000 MWCO ultrafiltration unit. The NO level was measured using the “Nitric Oxide (total)” assay kit (ADI-917-020) from Enzo Life Sciences Inc. (USA).

Statistical analysis

Intergroup differences in NO concentration were analyzed using Student’s t-test and the Mann–Whitney U test in GraphPad Prism 8.0 software. A p-value of less than 0.05 was considered statistically significant.

Results*Determination of nitric oxide concentration in the blood serum of the bronchial asthma and control groups*

In this study, the concentration of nitric oxide (NO) in the blood serum of patients diagnosed with bronchial asthma and healthy controls was determined using enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). A total of 33 patients with bronchial asthma and 8 healthy volunteers were included. Based on the clinical features of disease progression, the asthma group was subdivided into controlled, partially controlled, and uncontrolled subgroups. This classification was based on the frequency and severity of symptoms, pulmonary function parameters, and responsiveness to treatment.

The analysis assessed statistical differences between the asthma and control groups and identified changes in immune response levels. As shown in Figure 1, the NO concentration in the blood serum, measured at a wavelength of 570 nm, was compared across the study groups. The results revealed that the mean nitric oxide level in the control group was 50.95 $\mu\text{mol/L}$, whereas in patients with bronchial asthma, it was 68.09 $\mu\text{mol/L}$, indicating a 1.34-fold increase in the asthma group compared to healthy individuals.

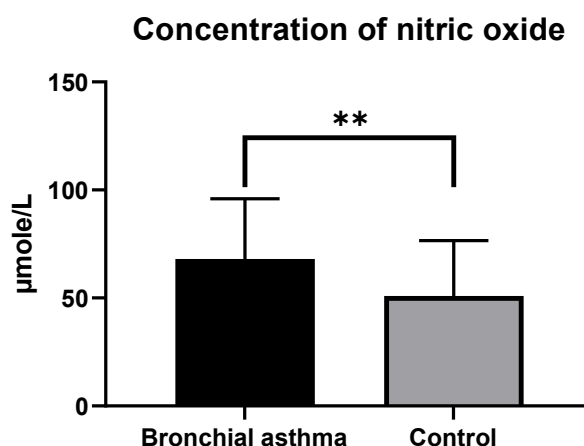


Figure 1. Nitric oxide concentration in the study groups (** p=0.001)

Analysis of nitric oxide concentration in the blood serum of bronchial asthma patients according to sex and age

In this study, we analyzed the concentration of nitric oxide (NO) in the blood serum of patients with bronchial asthma based on sex and age. Among male patients, the average NO concentration was 67 µmol/L, while among female patients it was 68 µmol/L. No statistically significant difference was observed between the sexes.

Further analysis was conducted to evaluate age-related differences. Among patients under the age of 65, the NO concentration was 75 µmol/L in women and 72 µmol/L in men. In contrast, in the group over 65 years of age, the NO levels were 58 µmol/L in women and 61 µmol/L in men. A statistically significant difference was found in NO levels between the younger and older age groups among female patients (p = 0.0347) (Figure 2).

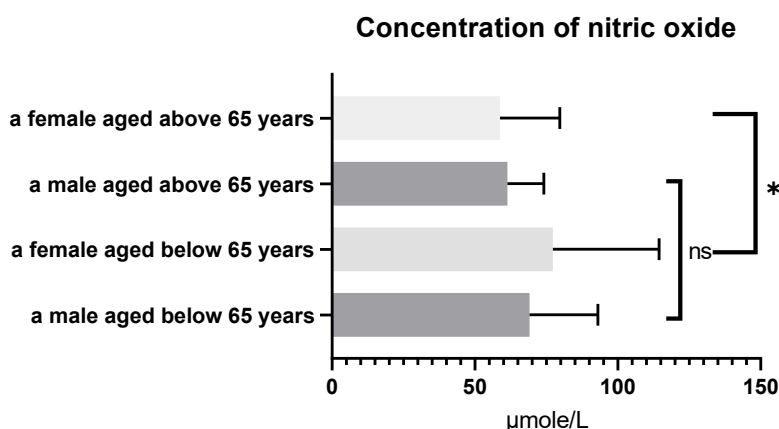


Figure 2. Age-related changes in nitric oxide (NO) concentration in the study groups (*p = 0.0347)

Analysis of nitric oxide concentration in blood serum according to asthma control level

According to the recommendations of the World Health Organization (WHO) and the Global Initiative for Asthma (GINA), bronchial asthma is classified into three categories based on symptom control and disease severity: controlled asthma, partially controlled asthma, and

uncontrolled asthma [5]. In this study, a total of 33 patients diagnosed by a pulmonologist at City Hospital No. 2 in Astana were included: 7 with controlled asthma, 13 with partially controlled asthma, and 13 with uncontrolled asthma.

When comparing the serum, NO levels between the asthma subgroups and the healthy control group, the average NO concentration in the controlled asthma group was 63.38 $\mu\text{mol/L}$, which was 1.24 times higher than in the control group (50.95 $\mu\text{mol/L}$). However, this difference was not statistically significant ($p = 0.2593$).

In contrast, patients with partially controlled asthma had a mean NO level of 66.53 $\mu\text{mol/L}$, significantly higher than the control group ($p = 0.0355$), representing a 1.31-fold increase (Figure 3a). These findings indicate that nitric oxide levels are associated with asthma control status and support the role of NO as a marker of airway inflammation [6].

Furthermore, the mean NO concentration in patients with uncontrolled asthma was 72.19 $\mu\text{mol/L}$, which is approximately 1.42 times higher than in the control group (50.95 $\mu\text{mol/L}$). This difference was statistically significant ($p = 0.0033$), clearly demonstrating that NO levels increase in patients with poorly controlled asthma (Figure 3b).

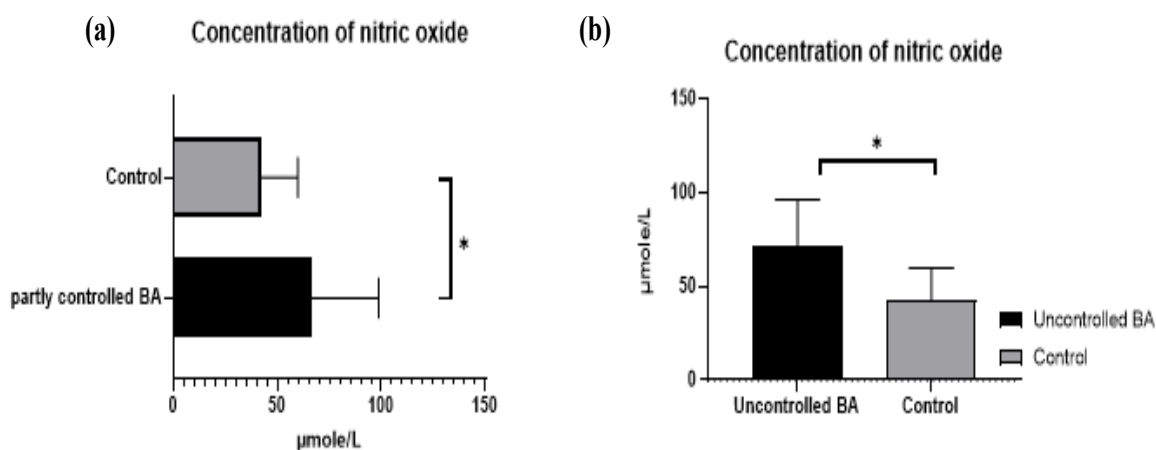


Figure 3. (a) Comparative results of nitric oxide (NO) concentration in blood plasma between patients with partially controlled bronchial asthma (BA) and the control group (measured at a wavelength of 570 nm). **(b)** Comparative results of nitric oxide (NO) concentration in blood plasma between patients with uncontrolled bronchial asthma (BA) and the control group (measured at a wavelength of 570 nm).

ROC curve analysis of nitric oxide levels

A Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis was performed based on nitric oxide (NO) concentration to assess how effectively NO levels differentiate patients with bronchial asthma from healthy individuals, and to evaluate its potential use as a diagnostic biomarker. The area under the ROC curve (AUC) was found to be 0.6932 ($p = 0.013$), indicating a moderate diagnostic value of nitric oxide concentration for identifying the disease.

The analysis showed a sensitivity of 69.4% (0.69375) and a specificity of 53.9% (0.5386). The 95% confidence interval (CI) for the AUC ranged from 0.5456 to 0.8408 (Figure 4).

These findings suggest that while nitric oxide concentration alone can serve as a supportive diagnostic tool for bronchial asthma, its moderate sensitivity and specificity indicate that it may be most effective when used in combination with additional biomarkers to improve diagnostic accuracy.

ROC curve for nitric oxide concentration

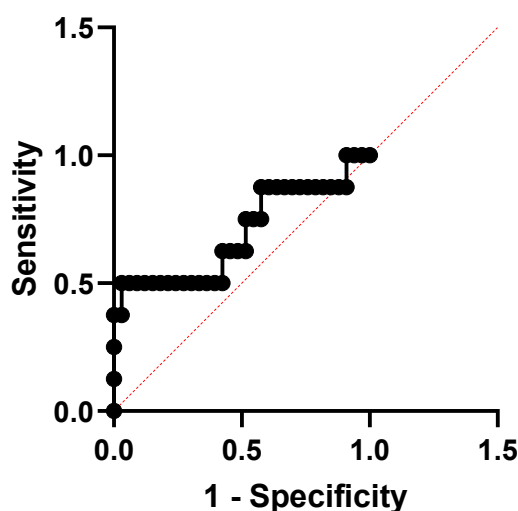


Figure 4. ROC analysis of nitric oxide levels for the diagnosis of bronchial asthma (AUC = 0.6932, $p = 0.013$)

Discussion

Since the early 2000s, the role of nitric oxide (NO) in the pathophysiology of airway inflammatory diseases has been the focus of active research [6-9]. Barnes [10] was the first to suggest that NO produced by nNOS (neuronal nitric oxide synthase) contributes to bronchodilation through the activation of NANC (non-adrenergic non-cholinergic) nerves. In contrast, eNOS (endothelial nitric oxide synthase) induces vasodilation and plasma extravasation, whereas excessive iNOS (inducible nitric oxide synthase) activity enhances mucus secretion, promotes eosinophil recruitment, and sustains Th2-mediated inflammation [11-15].

It has been established that NO concentrations are elevated in the exhaled air of patients with asthma [16], as well as in experimental models of chronic inflammation [13, 17]. This increase is mainly attributed to iNOS expression [10]. Treatment with inhaled corticosteroids (ICS) reduces FeNO (fractional exhaled nitric oxide) levels [18], whereas β 2-agonists have little to no significant effect [19]. Administration of NOS inhibitors (L-NAME, aminoguanidine) likewise decreases FeNO [20]. Clinical studies further confirm that FeNO reflects inflammatory activity and assists in identifying the most severe asthma phenotypes, although several reports have failed to demonstrate a direct correlation with airway eosinophilia [21].

Despite some controversy, most authors recognize FeNO as a valuable biomarker for monitoring airway inflammation and assessing treatment efficacy [22,23]. In experimental

settings, NO donors induced smooth muscle relaxation and reduced bronchospasm, whereas NOS inhibition, by contrast, enhanced bronchoconstriction. The role of NO as a modulator of distal airway tone remains an area of ongoing investigation [24, 25].

Considerable attention has also been directed to the involvement of NO in airway remodeling. Evidence suggests that iNOS contributes to excessive deposition of collagen and elastin, whereas NO derived from cNOS (constitutive nitric oxide synthase) may exert protective effects [13, 26]. Positive correlations have been reported between NO metabolites and markers of remodeling, as well as with activation of arginase and matrix metalloproteinases [15, 27-29]. In addition, iNOS-driven NO production can lead to the formation of peroxynitrite and isoprostanes (8-iso-PGF 2α), which further enhance bronchoconstriction and oxidative stress [30].

In parallel, extensive clinical data have accumulated supporting the diagnostic and prognostic value of FeNO. Across all systematically analyzed studies, FeNO is regarded as a reliable indicator of Th2-mediated inflammation with diagnostic, prognostic, and therapeutic relevance [31-36]. For example, de Abreu et al. [33] demonstrated that FeNO levels >30 ppb are associated with uncontrolled asthma and a decrease in response to ICS, making this parameter a convenient tool for monitoring treatment efficacy. Maniscalco et al. [34] further elaborated on the mechanisms of NO synthesis in asthma and emphasized the role of FeNO in disease phenotyping, particularly in Th2-high forms, where targeted biologics directed against IL-4, IL-5, and IL-13 have proven effective.

A large-scale meta-analysis by Murugesan et al., comprising 43 studies and over 16,000 patients, confirmed the high diagnostic accuracy of FeNO (sensitivity 72%, specificity 75%, AUC = 0.81) [35]. The greatest value was observed in children and in patients with eosinophilic inflammation. Findings by Nguyen et al. [36] demonstrated that patients with elevated FeNO levels had lower asthma control scores (ACT) and reduced FEV1. Also confirmed the clinical applicability of FeNO, emphasizing its role in optimizing ICS prescription and supporting a personalized approach to treatment [37].

In pediatric practice, FeNO is of particular importance, as nitric oxide levels are elevated in children with asthma and correlate with sensitization to aeroallergens—an observation critical for phenotyping and for the development of clinical guidelines [31, 33].

Despite the substantial body of evidence, certain limitations remain: FeNO levels may vary depending on smoking status, allergic rhinitis, infections, and ICS therapy. Accordingly, most experts recommend using FeNO as part of a multimodal assessment, alongside blood eosinophil counts, serum IgE, ACT scores, and spirometry.

In summary, nitric oxide plays a dual role in the pathogenesis of asthma: it contributes to bronchodilation and protects the extracellular matrix, yet excessive iNOS expression promotes inflammation, remodeling, and oxidative stress. FeNO, as a surrogate marker of these processes, has established itself as a valuable adjunct biomarker for the diagnosis, monitoring, and personalization of asthma therapy.

Conclusion

In conclusion, the assessment of nitric oxide (NO) levels stands out as a reliable, accessible, and informative biomarker that enables the objective evaluation of the clinical condition of

patients with bronchial asthma, the precise determination of airway inflammatory activity, and the assessment of disease control. The significant variation in NO levels depending on asthma phenotypes and control status supports its broad applicability in clinical practice, particularly for personalized therapy and disease monitoring.

Given that NO measurement is non-invasive, rapid, and easily repeatable, it can serve as a valuable supplementary tool for the early diagnosis of asthma and for monitoring treatment response. Moreover, the observed differences related to age and asthma control status further emphasize the clinical importance of this biomarker.

Future studies that integrate nitric oxide levels with other biomarkers in a comprehensive approach may provide deeper insights into asthma pathogenesis and contribute to the development of more precise therapeutic strategies.

Author Contributions

A.A.* (A. Aripova) – concept and supervision of the work; **A.A. (A. Aitkazina)** – collection of materials, medical expertise, interpretation of clinical data; **A.S.** – conducting the experiments; **A.A.*, A.K., O.B.** – discussion of the research results; **A.S., A.A.*** – writing the text; **A.A.*, R.B.** – editing the text of the article.

Funding

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (AP26100907, “Identification of molecular-epigenetic markers for asthma – chronic obstructive pulmonary disease overlap syndrome for molecular diagnostics and personalized medicine”).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Compliance with ethical standards

Peripheral blood samples for this study were collected from participants (patients and control group) with their informed consent and with the approval of the Ethics Committee of JSC “Astana Medical University” (Protocol No. 4 dated September 7, 2017).

References

1. World Health Organization. Asthma [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2025 Feb 23]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asthma>
2. Global Initiative for Asthma. Global strategy for asthma management and prevention. CiNii Research; 2023.
3. Abdulwehab S, Kedir F. Patient autonomy in self-managing their bronchial asthma exacerbation and its associated factors. *Front Allergy*. 2024;25;5:1483897. doi.org/doi:10.3389/falgy.2024.1483897
4. Tiotiu AI, Novakova P, Nedeva D, et al. Impact of air pollution on asthma outcomes. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;27;17(17):6212. doi.org/10.3390/ijerph17176212
5. Нефедов ИВ, Шишиморов ИН, Магницкая ОВ. Оксид азота в выдыхаемом воздухе как предиктор эффективности базисной терапии бронхиальной астмы у детей. *Научные результаты биомедицинских исследований*. 2020;6(2):238–248. doi.org/10.18413/2658-6533-2020-6-2-0-8

6. Kobayashi K, Nishimura Y, Yamashita T, et al. The effect of overexpression of endothelial nitric oxide synthase on eosinophilic lung inflammation in a murine model. *Int Immunopharmacol.* 2006;6(7):1040–1052. doi.org/10.1016/j.intimp.2005.09.016.
7. Garvey EP, Oplinger JA, Furfine ES, et al. 1400W is a slow, tight binding, and highly selective inhibitor of inducible nitric-oxide synthase in vitro and in vivo. *J Biol Chem.* 1997;272(8):4959–4963. doi.org/10.1074/jbc.272.8.4959.
8. Van Camp JR, Yian C, Lupinetti FM. Regulation of pulmonary vascular resistance by endogenous and exogenous nitric oxide. *Ann Thorac Surg.* 1994;58(4):1025–1030. doi.org/10.1016/0003-4975(94)90448-0.
9. Poon BY, Raharjo E, Patel KD, Tavener S, Kubes P. Complexity of inducible nitric oxide synthase: cellular source determines benefit versus toxicity. *Circulation.* 2003;108(9):1107–1112. doi.org/10.1161/01.CIR.0000086321.04702.AC.
10. Barnes PJ. NO or no NO in asthma? *Thorax.* 1996;51(2):218–220. doi.org/10.1136/thx.51.2.218.
11. Meurs H, Maarsingh H, Zaagsma J. Arginase and asthma: novel insights into nitric oxide homeostasis and airway hyperresponsiveness. *Trends Pharmacol Sci.* 2003;24(9):450–455. doi.org/10.1016/S0165-6147(03)00227-X.
12. Prado CM, Leick-Maldonado EA, Kasahara DI, et al. Effects of acute and chronic nitric oxide inhibition in an experimental model of chronic pulmonary allergic inflammation in guinea pigs. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol.* 2005;289(4):L677–L683. doi.org/10.1152/ajplung.00010.2005.
13. Prado CM, Leick-Maldonado EA, Yano L, et al. Effects of nitric oxide synthases in chronic allergic airway inflammation and remodeling. *Am J Respir Cell Mol Biol.* 2006;35(4):457–465. doi.org/10.1165/rcmb.2005-0391OC.
14. Schuilting M, Meurs H, Zuidhof AB, et al. Dual action of iNOS derived nitric oxide in allergen-induced airway hyperreactivity in conscious, unrestrained guinea pigs. *Am J Respir Crit Care Med.* 1998;158(5):1442–1449. doi.org/10.1164/ajrccm.158.5.9803027.
15. Meurs H, McKay S, Maarsingh H, et al. Increased arginase activity underlies allergen-induced deficiency of cNOS-derived nitric oxide and airway hyperresponsiveness. *Br J Pharmacol.* 2002;136(3):391–398. doi.org/10.1038/sj.bjp.0704725.
16. Kharitonov SA, Yates D, Robbins RA, et al. Increased nitric oxide in exhaled air of asthmatic patients. *Lancet.* 1994;343(8890):133–135. doi.org/10.1016/S0140-6736(94)90931-8.
17. Leick-Maldonado EA, Kay FU, Leonhardt MC, et al. Comparison of glucocorticoid and cysteinyl leukotriene receptor antagonist treatments in an experimental model of chronic airway inflammation in guinea-pigs. *Clin Exp Allergy.* 2004;34(1):145–152. doi.org/10.1111/j.1365-2222.2004.01854.x.
18. Yates DH, Kharitonov SA, Thomas PS, Barnes PJ. Endogenous nitric oxide is decreased in asthmatic patients by an inhibitor of inducible nitric oxide synthase. *Am J Respir Crit Care Med.* 1996;154(1):247–250. doi.org/10.1164/ajrccm.154.1.8680689.
19. Yates DH, Kharitonov SA, Barnes PJ. Effect of short- and long-acting inhaled β_2 -agonists on exhaled nitric oxide in asthmatic patients. *Eur Respir J.* 1997;10(7):1483–1488. doi.org/10.1183/09031936.97.10071483.
20. Brindicci C, Ito K, Barnes PJ, Kharitonov SA. Effect of an inducible nitric oxide synthase inhibitor on differential flow-exhaled nitric oxide in asthmatic patients and healthy volunteers. *Chest.* 2007;132(2):581–588. doi.org/10.1378/chest.06-3046.

21. Dweik RA, Sorkness RL, Wenzel S, et al. Use of exhaled nitric oxide measurement to identify a reactive, at-risk phenotype among patients with asthma. *Am J Respir Crit Care Med*. 2010;181(10):1033–1041. doi.org/10.1164/rccm.200905-0695OC.
22. Pisi R, Aiello M, Tzani P, Marangio E, Olivieri D, Chetta A. Measurement of fractional exhaled nitric oxide by a new portable device: comparison with the standard technique. *J Asthma*. 2010;47(7):805–809. doi.org/10.3109/02770903.2010.485667.
23. Kharitonov SA, Barnes PJ. Clinical aspects of exhaled nitric oxide. *Eur Respir J*. 2000;16(4):781–792. doi.org/10.1183/09031936.00.16478100.
24. Kraft M. Part III: location of asthma inflammation and the distal airways: clinical implications. *Curr Med Res Opin*. 2007;23(Suppl 3):S21–S27. doi.org/10.1185/030079907X226177.
25. Angeli P, Prado CM, Xisto DG, et al. Effects of chronic L-NAME treatment lung tissue mechanics, eosinophilic and extracellular matrix responses induced by chronic pulmonary inflammation. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*. 2008;294(6):L1197–L1205. doi.org/10.1152/ajplung.00199.2007.
26. Eynott PR, Groneberg DA, Caramori G, et al. Role of nitric oxide in allergic inflammation and bronchial hyperresponsiveness. *Eur J Pharmacol*. 2002;452(1):123–133. doi.org/10.1016/S0014-2999(02)02237-9.
27. Ricciardolo FLM. Multiple roles of nitric oxide in the airways. *Thorax*. 2003;58(2):175–182. doi.org/10.1136/thorax.58.2.175.
28. Meurs H, Maarsingh H, Zaagsma J. Arginase and asthma: novel insights into nitric oxide homeostasis and airway hyperresponsiveness. *Trends Pharmacol Sci*. 2003;24(9):450–455. doi.org/10.1016/S0165-6147(03)00227-X.
29. Ohbayashi H, Shimokata K. Matrix metalloproteinase-9 and airway remodeling in asthma. *Curr Drug Targets Inflamm Allergy*. 2005;4(2):177–181. doi.org/10.2174/1568010053586246.
30. Sugiura H, Ichinose M. Oxidative and nitrative stress in bronchial asthma. *Antioxid Redox Signal*. 2008;10(4):785–797. doi.org/10.1089/ars.2007.1937.
31. Haccuria A, Michils A, Michiels S, Van Muylem A. Exhaled nitric oxide: a biomarker integrating both lung function and airway inflammation changes. *J Allergy Clin Immunol*. 2014;134(3):554–559. doi.org/10.1016/j.jaci.2013.12.1070.
32. Backman K, Piippo-Savolainen E, Arffman M, Korppi M. Exhaled nitric oxide is a reliable biomarker of asthma in children with aeroallergen sensitization but not in other children. *Pediatr Allergy Immunol*. 2023;34(2):e14044. doi.org/10.1111/pai.14044.
33. de Abreu FC, da Silva Júnior JLR, Rabahi MF. The Fraction Exhaled Nitric Oxide as a Biomarker of Asthma Control. *Biomark Insights*. 2019;14:1177271919826550. doi.org/10.1177/1177271919826550.
34. Maniscalco M, Bianco A, Mazzarella G, Motta A. Exhaled Nitric Oxide in Asthma: From Bench to Clinical Practice. *Cells*. 2023;12(21):2518. doi.org/10.3390/cells12212518.
35. Murugesan K, Alzahrani S, Parambil JV, et al. Diagnostic and Prognostic Value of Exhaled Nitric Oxide in Asthma: A Comprehensive Meta-Analysis of 43 Studies. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(8):1428. doi.org/10.3390/diagnostics13081428.
36. Nguyen VN, Phan NY, Hoang TV, et al. Clinical correlation between fractional exhaled nitric oxide (FeNO) levels and asthma control in Vietnamese patients. *J Thorac Dis*. 2020;12(2):541–550. doi.org/10.21037/jtd
37. Makarova SA, Kazina VV, Mineeva AV, et al. Fractional exhaled nitric oxide as a marker of bronchial inflammation in asthma: clinical and diagnostic value. *Mod Rehabil Med*. 2024;4(1):64–70.

Бронх демікпесі бар науқастардың қан сарысуынан азот оксидінің деңгейін зерттеу

А.Б. Сабинова¹, А.Т. Айтказина², А.А. Кусаинова¹, О.В. Булгакова¹, Р.І. Берсімбай¹, А.А.Арипова*¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²№2 Қалалық көпсалалы аурухана, Астана, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл алдын ала зерттеу жұмысы бронх демікпесі (БД) бар науқастардың сарысуындағы азот оксиді (NO) деңгейін анықтауға арналған. Азот оксиді БД патогенезінде маңызды рөл атқарады, өйткені ол бронхтардың тарылуына ықпал етіп, қабыну медиаторларының түзілуін ынталандырады, бұл өз кезегінде аурудың үдеуіне әкеледі. Зерттеуге 41 қатысушы енді, олардың қатарында ауруды бақылау деңгейі әртүрлі БД науқастары (бақыланатын, ішінара бақыланатын және бақыланбайтын астма) және БД диагнозы қойылмаған адамдар (бақылау тобы) болды. NO деңгейі Enzo Life Sciences Inc. (АҚШ) шығарған “Nitric Oxide (total)” (ADI-917-020) талдау жиынтығы арқылы өлшенді. Зерттеу нәтижелері БД бар науқастарда сарысудағы азот оксиді деңгейі бақылау тобымен салыстырғанда шамамен 1,34 есеге жоғары екенін көрсетті ($p=0,001$). Сонымен қатар, азот оксидінің концентрациясы жынысы мен жасына қарай талданды. 65 жастан асқан әйелдер мен жас әйелдер арасында статистикалық тұрғыдан маңызды айырмашылық анықталды ($p=0,0347$). Ішінара бақыланатын және бақыланбайтын БД бар науқастарды бақылау тобымен салыстырғанда NO деңгейі тиісінше 1,31 және 1,42 есе жоғары болды ($p=0,0355$ және $p=0,0033$). Бронх демікпесін диагностикалау үшін азот оксиді деңгейінің ROC талдауы қанағаттанарлық диагностикалық дәлдікті көрсетті ($AUC=0,6932$; $p=0,013$). Осылайша, бронх демікпесі бар науқастардың сарысуындағы азот оксидінің концентрациясын анықтау диагноз қоюда маңызды рөл атқаруы мүмкін және аурудың ықтимал биомаркері ретінде қолдануға болады.

Түйін сөздер: қабыну, бронх демікпесі, азот оксиді, қан сарысу биомаркері, қан сарысуындағы азот оксидінің деңгейі

Исследование уровня оксида азота в сыворотке крови у пациентов с бронхиальной астмой

А.Б. Сабинова¹, А.Т. Айтказина², А.А. Кусаинова¹, О.В. Булгакова¹,

Р.И. Берсимбаев¹, А.А.Арипова*¹

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Городская многопрофильная больница №2, Астана, Казахстан

Аннотация. Это предварительная исследовательская статья посвящена определению уровня оксида азота в сыворотке крови у пациентов с бронхиальной астмой (БА). Оксид азота играет важную роль в патогенезе бронхиальной астмы, так как приводит к сокращению бронхов и стимулирует выработку воспалительных медиаторов. В исследование был включен 41 участник, среди которых пациенты с БА различных категорий (контролируемая, частично контролируемая и неконтролируемая астма), а также лица без диагноза БА (контрольная группа). Уровень

оксида азота измеряли с использованием набора для анализа “Nitric Oxide (total)” (ADI-917-020) компании Enzo Life Sciences Inc. (США). Результаты показали, что у пациентов с бронхиальной астмой уровень оксида азота в сыворотке крови был в 1,34 раза выше, чем в контрольной группе ($p=0,001$). Дополнительно была проведена оценка концентрации оксида азота в зависимости от пола и возраста. Была выявлена статистически значимая разница между женщинами старше 65 лет и женщинами младшего возраста ($p=0,0347$). Сравнение концентрации оксида азота у пациентов с частично контролируемой и неконтролируемой БА с контрольной группой показало повышение уровня в 1,31 раза и 1,42 раза соответственно ($p=0,0355$ и $p=0,0033$). ROC-анализ уровня оксида азота для диагностики бронхиальной астмы продемонстрировал умеренную диагностическую точность ($AUC=0,6932$; $p=0,013$). Таким образом, определение уровня оксида азота в сыворотке крови может иметь важное значение для диагностики бронхиальной астмы и использоваться в качестве потенциального биомаркера заболевания.

Ключевые слова: воспаление, бронхиальная астма, оксид азота, сывороточный биомаркер, уровень оксида азота в сыворотке

Сведения об авторах:

Сабирова Алина Болатовна – магистрант кафедры общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Айтказина Айгерим Тлеубековна – магистр медицины, врач-пульмонолог ГКП на ПХВ «Городская многопрофильная больница №2», Т. Рыскулова, 6, 010000, Астана, Казахстан.

Кусаинова Асия Арыслановна – PhD, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института клеточной биологии и биотехнологии, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Булгакова Ольга Владимировна – PhD, профессор кафедры общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Берсимбай Рахметкажи Искендерович – академик НАН РК, директор Научно-исследовательского института клеточной биологии и биотехнологии, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Арипова Акмарал Алтынбаевна – PhD, и.о. доцента кафедры общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Сабирова Алина Болатовна – жалпы биология және геномика кафедрасының білім алушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш. 2, Астана, Қазақстан.

Айтказина Айгерим Тлеубековна – медицина магистрі, пульмонолог дәрігер, ШЖҚ «№2 Қалалық көпсалалы аурухана», Т. Рысқұлов көш. 6, 010000, Астана, Қазақстан.

Кусаинова Асия Арыслановна – PhD, Жасуша биологиясы және биотехнология ғылыми-зерттеу институтының аға ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш. 2, Астана, Қазақстан.

Булгакова Ольга Владимировна – PhD, жалпы биология және геномика кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш. 2, Астана, Қазақстан.

Берсімбай Рахметқажы Искендірұлы – ҚР ҰҒА академигі, Клеткалық биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институтының директоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш. 2, Астана, Қазақстан.

Арипова Акмарал Алтынбаевна – PhD, жалпы биология және геномика кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Information about the authors:

Sabirova Alina – Learner of the Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev Street 2, Astana, Kazakhstan.

Aitkazina Aigerim – Master of Medicine, pulmonologist, Municipal State Enterprise on the Right of Economic Management "City Multidisciplinary Hospital No. 2", T. Ryskulov Street, 6, 010000, Astana, Kazakhstan.

Kussainova Assiya – PhD, senior researcher, Research Institute of Cell Biology and Biotechnology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str. 2, Astana, Kazakhstan.

Bulgakova Olga – PhD, Professor, Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str. 2, Astana, Kazakhstan.

Bersimbaev Rakhmetkazhy – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Director of the Research Institute of Cell Biology and Biotechnology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str. 2, Astana, Kazakhstan.

Aripova Akmaral – PhD, Acting associate professor, Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev Street, 010000, Astana, Kazakhstan.



ХҒТАР 34.43.41.; 34.49.01

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-20-38>

Ғылыми мақала

Стрептозотоциндік диабеттің ағымына иондаушы сәуленің әсерін егеуқұйрықтардың иммунологиялық және биохимиялық жағдайын талдау арқылы зерттеу

О.З. Ильдербает*¹, К.В. Мутиг², Д.Е. Узбеки¹, Г.М. Жармаханова³, Г.О. Ильдербает¹, Ж.П. Сембаева¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²И.М. Сеченов атындағы Бірінші Мәскеу мемлекеттік медицина университеті, Мәскеу, Ресей

³М. Оспанов атындағы Батыс Қазақстан медицина университеті, Ақтөбе, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл зерттеуде стрептозотоцинмен индуцирленген 2 типті қант диабеті мен иондаушы ү-сәулеленудің егеуқұйрықтар организмiне жеке және қосарлы әсерлері зерттелді. Метаболикалық, иммунологиялық және биохимиялық көрсеткіштердің динамикасы бағаланды. Зерттеу нәтижесінде әрбір фактор – стрептозотоцин де, ү – сәулелену де – гипергликемия, инсулин секрециясының төмендеуі және антиоксиданттық қорғаныс жүйесінің әлсіреуін туындататыны анықталды. Бұл факторлардың бірлескен әсері кезінде аталған патологиялық өзгерістер күшейе түсті: қандағы глюкоза мен липидтердің асқын тотығу өнімдері деңгейінің айтарлықтай жоғарылауы, инсулиннің төмендеуі тіркелді. Иммундық жүйе тарапынан да елеулі бұзылыстар анықталды: лейкоциттер санының, Т-лимфоциттер мен Т-хелперлердің, иммунорегуляторлық индекс көрсеткішінің төмендеуі, фагоцитоздың әлсіреуі және айналымдағы иммундық кешендер деңгейінің азаюы байқалды. Ең айқын өзгерістер стрептозотоцин мен ү-сәулеленудің қосарлы әсері жағдайында тіркеліп, олардың зақымдаушы әсерінің синергиялық сипатын көрсетті. Алынған нәтижелер бұл эксперименттік модельдің метаболикалық және радиациялық факторлармен байланысты иммун тапшылығының патогенезін зерттеу үшін, сондай-ақ иммуномодуляторлық және радиопротекторлық әсері бар препараттардың тиімділігін бағалау үшін жоғары ғылыми маңыздылығын көрсетеді. **Түйін сөздер:** 2 типті қант диабеті, стрептозотоцин, ү-сәулелену, метаболизм, иммунитет, оксидативті күйзеліс

Кіріспе

Қазіргі таңда қант диабеті және иондаушы сәулелену сияқты созылмалы метаболикалық және экологиялық факторлардың адам ағзасына кешенді әсері ғылыми қауымдастықтың назарын аударуда. 2 типті қант диабеті — инсулинге тәуелсіз гипергликемиямен, көмірсу мен липидтер алмасуының бұзылуымен сипатталатын

Түсті: 01.06.2025. Қабылданды: 30.09.2025. Онлайн қол жетімді: 30.09.2025.

көпфакторлы ауру. Иондаушы ү-сәулелену - жасушалық құрылымдарға, әсіресе ДНҚ мен иммундық жүйе элементтеріне тікелей және жанама зақым келтіретін қуатты физикалық фактор.

Қант диабетінің екі негізгі клиникалық түрі ажыратылады. 1 типті қант диабеті аутоиммундық механизм арқылы β-жасушалардың жойылуымен сипатталады. Бұл жағдайда инсулин өндіру мүлдем тоқтайды. 2 типті қант диабеті көбіне ересектер арасында тіркеледі және семіздік, физикалық белсенділіктің төмендеуі мен тұқым қуалайтын бейімділік сияқты факторлармен байланысты. Бұл түрінде инсулин жеткілікті мөлшерде өндірілуі мүмкін, бірақ нысана-жасушалардың оған сезімталдығы төмендеп, инсулинорезистенттік дамиды [1,2]. Қант диабеті ұзақ уақыт бойы бақылаусыз қалғанда, ағзада түрлі жүйелік асқынулар дамуы мүмкін: ангиопатиялар, нефропатия, ретинопатия, жүрек-қан тамыр жүйесі ауруларының, оның ішінде миокард инфаркті мен инсульттің даму қаупінің артуы жатады [3].

Қант диабеті (ҚД) – ағзаның иммундық жүйесімен күрделі өзара байланыста болатын ауру. Көмірсулар алмасуының бұзылуы мен инсулин тапшылығы иммундық жауаптың өзгеруіне әсер етсе, керісінше, иммундық жүйе де ауру патогенезінде, әсіресе 1 типті қант диабеті (ҚД1) кезінде, маңызды рөл атқарады. ҚД1 - аутоиммундық сипаттағы ауру, мұнда ағзаның иммундық жүйесі ұйқы бездің инсулин өндіретін β-жасушаларын бөгде ретінде танып, оларды жояды. Аутоиммундық реакцияға негізінен Т-лимфоциттер қатысады. Олар β-жасушалардың беткейіндегі антигендерді таниды және цитотоксикалық реакцияны іске қосады [4,5].

Осылайша, гипергликемия иммундық жүйенің қызметіне әсер етіп, ағзаның инфекциялық агенттерге қарсы күресу қабілетін төмендетеді. Бұл қант диабетімен ауыратын адамдарда тері, несеп-жыныс және тыныс алу жолдарының инфекциялық ауруларының жиілігі мен ауырлығының артуына ықпал етеді. Сонымен қатар, диабеті бар науқастарда жиі Т-жасушалық дисфункция байқалады, бұл да иммундық жауаптың әлсіреуіне себеп болуы мүмкін [6,7].

Қант диабеті кезінде көмірсулар алмасуы бұзылып, қандағы глюкоза деңгейі тұрақты түрде жоғарылайды. Гипергликемия ағзада көптеген патологиялық үдерістерді, соның ішінде липидтердің асқын тотығу (ЛАТ) үдерісінің күшеюін және антиоксиданттық қорғаныс жүйесінің (АОЖ) тиімділігінің төмендеуін туындатады. Бұл өзгерістер қант диабетінің асқынуларының дамуына ықпал ететін маңызды факторлар болып табылады [8]. Белсенді оттегі түрлерінің (БОТ) түзілуі теңгерілген түрде жүреді және олар иммундық жауапты қоса алғанда, әртүрлі биологиялық үдерістерге қатысады. Алайда БОТ шамадан тыс жиналған жағдайда тотығу күйзелісі туындайды, бұл кезде бос радикалдар жасушалар мен тіңдерді зақымдай бастайды [9,10].

Асқын тотығу өнімдері жасушаларға уытты әсер етіп, мембраналардың тұтастығын бұзады, нәруыздар мен ДНҚ құрылымын өзгертеді. Бұл жасушалардың қартаюын жеделдетіп, метаболизмнің бұзылуына және созылмалы қабыну үдерістерінің дамуына алып келеді [11]. Қант диабеті жағдайында АОЖ белсенділігі төмендейді, нәтижесінде бос радикалдар мен ЛАТ өнімдерінің әсері күшейіп, қант диабетіне тән асқынулардың – ретинопатия, нефропатия, нейропатия және атеросклероздың – дамуына ықпал етеді [12]. Осылайша, қант диабеті кезінде ЛАТ күшеюі және АОЖ әлсіреуі нәтижесінде айқын оксидативтік күйзеліс дамиды. Бұл үдерістер жасушалардың зақымдануына және диабетке тән созылмалы асқынулардың қалыптасуына себеп болады.

Иондаушы сәулелену тек қан жасушалары мен ДНҚ-ға ғана емес, бүкіл эндокриндік жүйеге де әсер етеді. Ұйқы безі де басқа ағзалар сияқты радиацияның, әсіресе жоғары дозаларының, әсерінен зақымдалуы мүмкін. Мұндай әсер β -жасушалардың – инсулин өндіруге жауапты жасушалардың – қызметінің бұзылуына әкеліп, нәтижесінде гипергликемияны тудыруы ықтимал [13]. Кейбір зерттеулердің мәліметтеріне сүйенсек, молекулалық деңгейде радиация инсулин рецепторларын, жасушалардағы митохондрия құрылымдарын зақымдап, зат алмасуды реттейтін гендерде мутациялар туғызуы мүмкін [14]. Жоғарыда келтірілген деректерге сүйене отырып, иондаушы сәулеленудің зат алмасуына және қант диабетінің дамуына әсер ету механизмдерін одан әрі зерттеу орынды деп санаймыз. Қарастырылып отырған үдерістерді тереңірек түсіну радиациялық әсердің метаболикалық салдарын азайтуға бағытталған алдын алу және емдеу стратегияларын әзірлеуге мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты. Иондаушы сәулеленудің эксперименттік жолмен индуцирленген 2 типті қант диабеті жағдайындағы иммунологиялық және биохимиялық көрсеткіштерге әсерін зерттеу.

Материалдар мен зерттеу әдістері

Қойылған мақсатты іске асыру үшін виварий жағдайында ұсталынған салмағы 200 ± 20 грамм болатын 80 ақ зертханалық аталық егеуқұйрықтарға 4 сериядан тұратын тәжірибе жүргізілді. I – бақылау тобы; II – 2 типті қант диабеті (ҚД2) модельденген жануарлар; III – сәулеленген жануарлар; IV – 2 типті қант диабеті бар сәулеленген жануарлар. Егеуқұйрықтар тәжірибеден эфир наркозы аясында толық емес декапитация әдісі арқылы, локалді этикалық комитеттің талабы бойынша және Хельсинки декларациясының жануарларға адамгершілікпен қарау жөніндегі халықаралық принциптеріне сәйкес шығарылды [15]. III және IV топтағы жануарларға бір реттік 6 Гр дозада сәулелену жүргізілді. 2 типті қант диабеті стрептозотонинмен (MP Biomedicals, АҚШ) индуцирленді. Бұл препарат ұйқы безінің β -эндокриноциттеріне тропты әсер етеді, жануарларға 30 мг/кг дозада іш қуысына енгізілді (II және IV топтар). Бұл үлгі адамдағы 2 типті қант диабетіне патогенетикалық жағынан ең жақын жолы болып саналады. Қант диабетінің 2 типінің қалыптасуын растау үшін стрептозотонин енгізілгеннен кейін 2 апта өткен соң аш қарын кезінде қандағы глюкоза деңгейі анықталды. ҚД2 тобына жануарларды енгізудің критерийі – глюкоза концентрациясының 7,0 ммоль/л-ден жоғары болуы.

Метаболикалық көрсеткіштерді анықтау

Глюкоза мөлшері экспресс-әдіспен, яғни глюкометр арқылы анықталды. Тұрақты гипергликемияның көрсеткіші ретінде гликирленген гемоглобин (HbA1c) деңгейі анықталды. Ұйқы безінің β -жасушаларының функционалдық белсенділігін және инсулинге төзімділік дәрежесін бағалау үшін қан сарысуындағы С-пептид пен қан плазмасындағы иммунореактивті инсулин концентрациясы арнайы тест-жүйелер арқылы өлшенді.

Иммунологиялық көрсеткіштерді анықтау

Барлық тәжірибелік жануарларда шеткері қандағы жалпы лейкоциттер мен лимфоциттердің саны анықталды. В- және Т-лимфоциттер мен олардың субпопуляцияларының саны иммунофлуоресценттік бояу әдісімен анықталды, ол үшін FITC-мен конъюгацияланған антиденелер қолданылды. Боялған жасушалар флуоресценттік микроскоп арқылы зерттелді. Алынған деректерді сандық өңдеу үшін иммунорегуляторлық индекс (ИРИ) есептелді. Лейкоциттердің миграциясын тежейтін реакцияны (ЛМТР) фитогемагглютининмен (ФГА) жүргізілді [16]. Айналымдағы иммундық комплекстердің (АИК) концентрациясы анықталды [17]. Нейтрофилдердің белсенділігін бағалау үшін нитрокөк-тетразолий сынағы (НКТ) жүргізілді [18].

Биохимиялық көрсеткіштерді анықтау

ЛАТ өнімдерінің бірі диендік конъюгаттар (ДК) мөлшері лимфоциттер мен ұйқы безі гомогенатында анықталды [19]. МДА мөлшері анықталды [20]. АОЖ ферменттері глутатионредуктаза (ГлР) және глутатионпероксидаза (ГлП) ферменттерінің белсенділігі анықталды [21] және каталаза (КТ) ферменті белсенділігі анықталды [22].

Статистикалық өңдеу

Деректердің статистикалық талдауы STATISTICA 8.0 бағдарламасы арқылы жүргізілді. Топтық мәліметтер бойынша орташа арифметикалық мән (М) және стандартты ауытқу есептелді. Айырмашылықтардың маңыздылығы Стюденттің t-критерийі бойынша бағаланды.

Зерттеу нәтижелері

Эксперименттік жануарлардың метаболикалық статусы

Біз қолданған стрептозотоцин мен иондалған сәулелену ақ егеуқұйрықтардың биохимиялық көрсеткіштерін өзгертті. Стрептозотоцин енгізілгеннен кейін егеуқұйрықтарда қандағы глюкозаның еркін концентрациясы 7,0 ммоль/л-ден жоғары болып, қант диабетінің 2-типі (ҚД2) дамығаны байқалды (Кесте 1).

Кесте 1

Зерттелген тәжірибелік жануарлардағы метаболикалық көрсеткіштерінің өзгерісі

Көрсеткіштер	I-бақылау	II -ҚД2	III-сәулелену	IV-ҚД2 + сәулелену
Глюкоза концентрациясы, ммоль/л	6,02±0,32	7,25±0,52*	10,24±0,81**	10,78±0,93**
Гликирленген гемоглобин, %	2,85±0,22	3,35±0,23	3,22±0,18	3,76±0,24*
Иммунореактивті инсулин, нг/мл	0,64±0,09	0,87±0,07*	0,69±0,04	0,83±0,06
С-пептид, нг/мл	2,01±0,2	2,95±0,19*	2,54±0,17*	3,32±0,25**

Ескерту: бақылау топпен салыстырғанда нақты: *-p<0,05; **-p<0,01.

Иммунореактивті инсулиннің концентрациясы II, III және IV топтардың барлығында жоғарылағанымен, статистикалық тұрғыда нақты артуы тек қана диабет шақырылған топта болды, артуы 36%-ды құрады ($p < 0,05$). Гликирленген гемоглобиннің деңгейі статистикалық түрде тек сәулеленуге ұшыраған диабет бар жануарларда 1,3 есе артқаны анықталды ($p < 0,05$). HbA1c көрсеткіші соңғы 12 аптадағы қандағы орташа глюкоза мөлшерін сипаттайды. IV топта глюкозаның ең жоғары концентрациясы тіркелді, бұл I топпен салыстырғанда нақты өзгеріске түскен. Қандағы глюкоза мөлшері неғұрлым жоғары болса, гемоглобинмен өздігінен байланысатын моносахаридтердің қитмалдығы да соғұрлым жоғары болады. II және III топтарда глюкоза концентрациясы IV топпен салыстырғанда шамалы төмен болғандықтан, Hb-пен байланысқан молекулалар саны да шамалы аздау болды, бұл олардың көрсеткіштері мен қалыпты топ арасындағы айырмашылықтың статистикалық тұрғыдан алғанда нақты болмауына себеп болуы мүмкін.

С-пептид – бұл жетілген инсулиннің прекурсоры болып табылатын проинсулиннің протеолиз үдерісінде бөлініп шығатын фракциясы. Қанда өлшенетін бос инсулин алдымен энзимолит нәтижесінде гепатоциттерге түсіп, кейіннен ғана қанайналым жүйесіне өтеді. Сондықтан инсулин концентрациясы β -жасушалардың белсенділігінің нақты көрсеткіші бола алмайды. Ал С-пептид концентрациясы ұйқыбезіндегі проинсулин синтезі деңгейін көрсетіп, салыстырмалы түрде тұрақты көрсеткіш саналады. Барлық эксперименттік топтарда С-пептидтің сарысудағы мөлшері бақылау тобымен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан нақты артқан: II топта – 46,76 % ($p < 0,05$), III топта – 26,36 % ($p < 0,05$), IV топта – 65,17 % ($p < 0,01$). Бұл деректерге сүйенсек, стрептозототиннің де, гамма-сәулеленудің де, олардың қосарлы әсерінің де β -жасушалар функциясының толық бұзылуына алып келмегені анық. Инсулин мен С-пептид деңгейлерінің арасындағы топтар бойынша жүйелі сәйкестік болмауы, инсулиннің бір бөлігінің бауыр жасушаларында жинақталуына байланысты болуы мүмкін. III және IV топтарда С-пептид концентрациясының айтарлықтай артуы, инсулин деңгейінің аз ғана өзгеруімен қатар жүруі, гамма-сәулелердің немесе екі фактордың біріктірілген әсерінен проинсулиннің энзимолитінің тежелуін де көрсетуі мүмкін. Сондай-ақ барлық тәжірибелік топтарда қандағы глюкоза деңгейінің статистикалық тұрғыда айтарлықтай артқаны байқалды: ҚД2 тобында – 20,43 % ($p < 0,05$), сәулелену тобында – 70,09 % ($p < 0,01$), ал қосарлы әсер алған тобында – 79,06 % ($p < 0,01$). Инсулин мен оның прекурсорының мөлшеріне қарағанда, II, III және IV топтарда β -жасушалар өз функцияларын сақтап қалған. Алайда III және IV топтарда қандағы глюкоза мөлшері II топпен немесе бақылаумен салыстырғанда біршама жоғары деңгейде болды. Демек, γ -сәулелер стрептозототинге қарағанда инсулинге резистенттілігін арттыра түскен, ал екі фактордың қосарлы әсері одан әрі күшейте түскені тіркелді. Алынған деректер стрептозототинмен индуцирленген 2 типті қант диабеті мен иондаушы сәулелену жеке әсер еткенде де метаболикалық бұзылыстар тудыратынын көрсетті. Бұл бұзылыстар гипергликемия және инсулин секрециясының өзгерістерімен сипатталады. Алайда бұл факторлардың қосарлы әсері анағұрлым айқын патологиялық өзгерістерге алып келген, бұл диабеттік жағдайға қарағанда радиациялық фактордың күшейткіш әсері бар екенін дәлелдейді.

Зерттелген тәжірибелік жануарлардың иммундық статусы

Тәжірибе түрінде диабет, иондаушы сәулелену және олардың қосарлы әсерін сипаттайтын көрсеткіштерге келсек, лейкоциттік және Т-лимфоциттік иммундық жауапты тежегені байқалды. Бұл CD3⁺ жетілген Т-жасушалары мен жалпы лейкоциттердің титрінің барлық тәжірибелік топтарда нақты төмендеуімен расталды ($p < 0,05$). II топта диабет CD8⁺ мен CD19⁺ белсенділігіне айтарлықтай әсер етпеген: CD8⁺ титрі бақылау тобымен салыстырғанда 11%-ға төмендеген ($p > 0,05$), ал CD19⁺ титрі 12%-ға артқан ($p > 0,05$) (Кесте 2). Барлық иммунокомпетентті жасушалар титрінің өзгерісі бір бағытта – азаю жағына қарай жылжыған. Лимфоциттер мен лейкоциттердің субпопуляцияларының мөлшері зақымдану дәрежесіне сай төмендегені байқалды: ең жоғары көрсеткіш заңды түрде – бақылау тобында, шамалы төмені – диабеттік тобында, одан да төмені – радиациялық әсерден кейінгі топта, ал ең төмен көрсеткіште болған – диабет пен сәулеленудің қосарлы әсеріне ұшыраған IV топтағы жануарларда тіркелді.

Кесте 2

Зерттелген тәжірибелік жануарлардағы иммундық жүйе көрсеткіштерінің өзгерісі

Көрсеткіштер		I – бақылау	II – ҚД2	III – сәулелену	IV – ҚД2+сәулелену
Лейкоцит $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	6,26 $\pm$ 0,36	5,20 $\pm$ 0,37 *	5,07 $\pm$ 0,39*	5,09 $\pm$ 0,24 *
Лимфоцит $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	2,61 $\pm$ 0,16	2,18 $\pm$ 0,14 *	2,15 $\pm$ 0,16*	2,08 $\pm$ 0,11 *
	%	35,78 $\pm$ 2,17	33,64 $\pm$ 2,05	32,54 $\pm$ 2,35	31,44 $\pm$ 1,73
Т-лимфоцит (CD3 ⁺) $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	1,58 $\pm$ 0,09	1,30 $\pm$ 0,10 *	1,26 $\pm$ 0,06*	1,18 $\pm$ 0,07 *
	%	29,55 $\pm$ 1,47	24,63 $\pm$ 1,83 *	25,01 $\pm$ 1,71*	24,07 $\pm$ 1,83 *
Т-хелпер (CD4 ⁺) $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	0,75 $\pm$ 0,05	0,61 $\pm$ 0,04 *	0,59 $\pm$ 0,03 *	0,48 $\pm$ 0,03**
	%	18,48 $\pm$ 1,54	14,58 $\pm$ 1,13*	14,45 $\pm$ 1,04 *	13,71 $\pm$ 1,02 *
Т-супрессор (CD8 ⁺) $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	0,56 $\pm$ 0,03	0,50 $\pm$ 0,03	0,48 $\pm$ 0,02*	0,44 $\pm$ 0,02 *
	%	11,43 $\pm$ 0,63	10,11 $\pm$ 0,64	10,03 $\pm$ 0,51	10,36 $\pm$ 0,74
В-лимфоцит (CD19 ⁺) $\times 10^9/\text{л}$	Абс. сан	0,43 $\pm$ 0,03	0,48 $\pm$ 0,03	0,41 $\pm$ 0,02	0,40 $\pm$ 0,02
	%	6,64 $\pm$ 0,48	7,76 $\pm$ 0,53	6,08 $\pm$ 0,35	6,55 $\pm$ 0,42
ИРИ	–	1,34 $\pm$ 0,07	1,22 $\pm$ 0,08	1,22 $\pm$ 0,05	1,09 $\pm$ 0,06 *
ЛМТР	индекс	0,88 $\pm$ 0,05	1,04 $\pm$ 0,06 *	1,13 $\pm$ 0,08*	1,12 $\pm$ 0,05 *
АИК	Ш.б.	1,36 $\pm$ 0,08	1,12 $\pm$ 0,08 *	1,08 $\pm$ 0,06*	1,09 $\pm$ 0,08 *
НКТ-тесті	%	3,78 $\pm$ 0,26	2,44 $\pm$ 0,18 **	2,47 $\pm$ 0,18**	2,36 $\pm$ 0,15 **

Ескерту: бақылау топпен салыстырғанда нақты: *- $p < 0,05$, **- $p < 0,01$.

Екі фактордың қосарлы әсер жағдайында ең көп зардап шеккен субпопуляция – CD4⁺, олардың титрі 36%-ға төмендеген ($p < 0,05$). CD8⁺ мөлшері 21%-ға кеміді ($p < 0,05$), ал CD19⁺ тек 7%-ға азайып, бұл өзгеріс нақты болмады ($p > 0,05$). В-лимфоциттердің титрі үш тәжірибелік топтың ешқайсысында бақылау тобымен салыстырғанда нақты өзгеріске ұшыраған жоқ. CD19⁺ рецепторлары бар жетілмеген В-жасушалар пулы жеткілікті болғанымен, гуморальды иммунитет пен антидене түзілуі бұзылуы мүмкін, себебі

антигенді МНС II молекуласы арқылы таныған соң, В-2-лимфоциттердің толық белсенуі үшін $CD4^{+}$ -мен байланыс қажет болады. Қосарлы әсерден кейін Т-хелперлер титрінің елеулі төмендеуі бұл процестің бұзылуына әкелуі ықтимал [23]. Иммунорегуляторлық индекс $CD4^{+}$ жасушаларының титрін $CD8^{+}$ жасушаларының мөлшеріне қатынасы ретінде есептелді. Бұл көрсеткіштің өзгерісі иммундық тапшылықты немесе аутоиммунды процестерді көрсетуі мүмкін, ал кері қатынас (1/1-ден төмен) иммундық жүйенің елеулі бұзылыстарын білдіреді [24]. Диабетке және сәулеленуге ұшыраған жануарларда ИРИ көрсеткіші бірдей болды – 1,22, бұл бақылау тобының 91,0%-ын құрады. $CD4^{+}$ жасушалары титрінің күрт төмендеуіне қарамастан, бұл өзгеріс нақты болмады ($p > 0,05$). Ал IV топта ИРИ 81,35%-ға дейін төмендеп, бұл көрсеткіш бақылау тобымен салыстырғанда нақты айырмашылық көрсетті ($p < 0,05$).

НКТ негізінде алынған пайыздық көрсеткіштер де тәжірибелік топтарда нақты түрде төмендеген: II топта – 35%-ға, III топта – 34%-ға және IV топта – 37%-ға төмендегені тіркелді ($p < 0,01$). Бұл нәтижелер нейтрофилдердің иммундық функциясының әлсірегенін көрсетеді. Егер олардың цитоплазмасындағы көк формазан гранулалары аз болса, бұл НАДФ-оксидаза ферментінің белсенділігінің төмендігін білдіреді. Бұл фермент супероксид радикалдарын түзіп, фагоциттелген патогендердің мембранасын бұзады. Демек, бұл тест нейтрофилдер функциясының сенімді маркері ретінде қарастырылуы мүмкін және олардың белсенділігі Т-киллерлер мен Т-хелперлер/Т-супрессорлар синтездейтін цитокиндер арқылы реттелетінін көрсетеді. АИК мөлшері де тәжірибелік топтардағы жануарларда нақты түрде төмендегені анықталды ($p < 0,05$). Атап айтқанда, стрептозотин енгізілгеннен кейін АИК титрі бақылау тобымен салыстырғанда 17%-ға, гамма-сәулелену жағдайында – 21%-ға, ал қосарланған әсер кезінде – 20%-ға төмендеген ($p < 0,05$). АИК - антигендер мен антиденелерден (көбінесе IgG немесе IgM) және комплемент жүйесінің компоненттерінен тұратын кешендер. Олар қалыпты иммундық жауаптың құрамдас бөлігі болып табылады. Қандағы АИК деңгейінің төмендеуі бірнеше механизмдер арқылы жүруі мүмкін: антигендердің азаюы, не болмаса антиденелер синтезінің азаюы. Жүргізілген зерттеу нәтижелері тәжірибелік топтарда иммундық жүйе тежелуіне байланысты АИК титрінің төмендегенін көрсетеді. Иммундық статустың әлсіреуі кезінде В-лимфоциттер синтездейтін антиденелер мөлшері де азаюы мүмкін. Антиденелер азайған сайын антигендермен байланысатын кешендер де азаяды, нәтижесінде АИК мөлшері де төмендеуі мүмкін.

Гамма-сәулелену мен стрептозотиннің әсері ЛМТР-ға да әсер етті. Бұл көрсеткіштің абсолюттік мәні барлық тәжірибелік топтарда бақылау тобына қарағанда жоғары болды. Атап айтқанда, стрептозотин енгізу ЛМТР көрсеткішін 18%-ға, сәулелену – 28%-ға, ал олардың қосарлы әсері – 27%-ға арттырды ($p < 0,05$). Бұл нәтижелер сәулеленудің ЛМТР көрсеткішіне стрептозотинмен салыстырғанда көбірек әсер ететінін көрсетеді. Лейкоциттердің миграциялық белсенділігін Т-жасушалар арқылы реттелетін функция ретінде зерттеу – Т-лимфоциттердің функционалдық белсенділігін бағалаудың сенімді әдістерінің бірі. Лейкоциттердің миграциясының тежелуі Т-жасушалардың белсенділігі артқан кезде байқалады, себебі белсендірілген лимфоциттер жоғары концентрацияда спецификалық лимфокиндерді бөліп шығарады. Бұл лимфокиндер гранулоциттердің, моноциттердің және макрофагтардың еркін қозғалысын тежейді [25]. II, III және IV топтарда лейкоциттердің қозғалыс белсенділігі бақылау тобына қарағанда жоғары. Бұл

құбылыс гамма-сәулелену немесе стрептозототин әсерінен Т-лимфоциттік иммундық бөлігінің тежелуін көрсетті. Сонымен қатар, сәулелену жағдайында иммундық жасушалардың қозғалыс жылдамдығы индуцирленген диабетке қарағанда 10%-ға жоғары болғандықтан, гамма-сәулелердің Т-жасушалық белсенділікті стрептозототинге қарағанда күштірек тежейтіні айқын байқалды.

Зерттелген тәжірибелік жануарлардың биохимиялық статусы

Тәжірибелік жануарларда ЛАТ өзгерісі. Бұл серияда жүргізілген зерттеулердің мәліметтеріне келсек, қант диабетіне ұшыраған ІІ-ші топтағы жануарларда бұл көрсеткіш $0,94 \pm 0,08$ шартты бірлікке дейін ($p < 0,05$) артқан, бұл гипергликемия мен созылмалы оксидативті күйзеліс жағдайында ЛАТ-ның белсенділігінің артқанын көрсетеді. ІІІ-ші топтағы сәулеленген жануарларда ДК деңгейі $1,18 \pm 0,10$ шартты бірлікке ($p < 0,01$) дейін артқан. Ал ІV-ші топта, яғни диабет пен сәулелену бірлесе әсер еткен жағдайда, бұл көрсеткіш $1,27 \pm 0,12$ шартты бірлікке ($p < 0,01$) дейін жеткен. Бұл мәлімет екі зақымдаушы фактордың синергиялық әсерін және жасуша ішілік антиоксиданттық гомеостаздың едәуір бұзылғанын білдіреді. Қан лимфоциттерінде де осындай өзгерістер байқалды. Бақылау тобында ДК $0,29 \pm 0,02$, диабетке ұшырағандарда – $0,35 \pm 0,02$ ($p < 0,05$), сәулеге жануарларда – $0,47 \pm 0,04$ ($p < 0,01$), ал екі фактордың бірлесе әсері кезінде – $0,48 \pm 0,03$ шартты бірлік ($p < 0,001$) болды. Бұл нәтижелер әртүрлі күйзеліс факторлары кезінде ЛАТ-ың жүйелі түрде күшейетінін көрсетеді (Кесте 3).

Кесте 3

Зерттелген тәжірибелік жануарлардағы ЛАТ өнімдерінің өзгерісі

	Зерттеу нысаны	I- бақылау	II - ҚД2	III – сәулелену	IV – ҚД2+сәулелену
ДК	Ұйқы безі	$0,71 \pm 0,06$	$0,94 \pm 0,08$ *	$1,18 \pm 0,10$ **	$1,27 \pm 0,12$ **
	Лимфоцит	$0,29 \pm 0,02$	$0,35 \pm 0,02$ *	$0,47 \pm 0,04$ **	$0,48 \pm 0,03$ ***
МДА	Ұйқы безі	$0,21 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,02$ *	$0,33 \pm 0,02$ **	$0,40 \pm 0,03$ ***
	Лимфоцит	$0,13 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$ *	$0,22 \pm 0,02$ **	$0,24 \pm 0,018$ ***

Ескерту: бақылау топпен салыстырғанда нақты: * - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$, *** - $p < 0,001$.

МДА – ЛАТ-ның соңғы және уытты өнімі де жоғарыда көрсетілген өзгерістер сияқты көрініс берген. Бақылау тобында ұйқыбезінде МДА деңгейі $0,21 \pm 0,02$ шартты бірлік болса, қант диабетіне ұшыраған топта бұл көрсеткіш $0,29 \pm 0,02$ ($p < 0,05$) дейін артты. Сәулеге ұшыраған жануарларда $0,33 \pm 0,02$ ($p < 0,01$) болды, ал екі фактордың бірлесе әсері бар ІV-ші топта бұл көрсеткіш ең жоғары – $0,40 \pm 0,03$ шартты бірлікке ($p < 0,001$) жеткен. Бұл деректер жасуша құрылымдарының айқын тотықты зақымдануын көрсетеді. Қан лимфоциттерін зерттеген кезде МДА деңгейі бақылау тобында $0,13 \pm 0,01$ құраса, диабетке ұшыраған жануарларда – $0,16 \pm 0,01$ ($p < 0,05$), бір мезеттік сәулеленуге ұшыраған жануарларда – $0,22 \pm 0,02$ ($p < 0,01$), ал қант диабеті мен сәулеленудің бірлесе әсеріне ұшыраған жануарларда – $0,24 \pm 0,018$ шартты бірлікте ($p < 0,001$) болды. Бұл МДА-ның жүйелік деңгейінің артуы липидтердің асқын тотығыуы үдерісінің күшейгенін білдіреді.

Басқа авторлардың зерттеулерінде МДА деңгейлеріне қатысты ағымдағы зерттеу нәтижелеріне сәйкес нәтижелерге қол жеткізген. 2 типті қант диабеті липидтердің асқын тотығуының жоғарылауымен байланысты екеніне тағы да көзімізді жеткіздік. Антиоксиданттар қант диабетінің өршуіне және пайда болуына жол бермейтіні белгілі. Бос радикалдардың түзілуін қандағы глюкозаның жоғарылауын болдырмау және қандағы глюкозаның тұрақсыздығын бақылау арқылы азайтуға болатыны анық. Қант диабетімен ауыратын науқастарда антиоксиданттарға өте жоғары физиологиялық қажеттілік болуы мүмкін [26-28]. Сонымен бірге, басқа зерттеушілердің нәтижелері қант диабетінде дененің тотығу күйзелісіне сезімтал екендігі және қандағы глюкозаның жоғары деңгейі липидтердің еркін радикалды асқын тотығуымен байланысты екендігі туралы дәлелдерді растады. Қант диабетінде МДА-ның жоғары деңгейі тотығу күйзелісінің жүрек-қан тамырлары асқынуларының патогенезінде маңызды рөл атқаратынын көрсетеді. Қант диабетіндегі оксидантты және антиоксидантты жүйелер арасында теңгерімсіздік жүрген [29, 30]. Алынған нәтижелер көрсеткендей, 2 типті қант диабеті де, ү-сәулелену де ЛАТ үдерісін күшейтеді. Бұл өзгерістер ДК мен МДА деңгейлерінің нақты жоғарылауымен сипатталды. Ең жоғары көрсеткіштер диабет пен сәулеленудің қосарлы әсері кезінде байқалды, бұл олардың кумулятивті және зақымдаушы әсерін дәлелдейді.

Тәжірибелік жануарлардағы антиоксиданттық жүйесінің өзгерісі. Сандық мәліметтер антиоксиданттық ферменттердің белсенділігі бақылау тобына қарағанда барлық тәжірибелік топтарда төмендегенін көрсетті (Кесте 4). Атап айтқанда, ГлР-ның ұйқы безіндегі белсенділігі бақылауда $28,15 \pm 2,56$ бірлік болса, қант диабеті бар жануарларда $23,24 \pm 2,03$ -ке ($p > 0,05$), сәулеленгендерде $21,34 \pm 1,81$ -ге ($p < 0,05$), ал диабетпен қатар сәулеленгендерде $21,17 \pm 1,56$ -ға ($p < 0,05$) дейін төмендеген. Қан лимфоциттерінде бұл ферменттің белсенділігі бақылаудан ($13,14 \pm 0,97$) диабет топтарында ($10,33 \pm 0,81$, $p < 0,05$), сәулеленген ($8,18 \pm 0,63$, $p < 0,01$) және диабетпен сәулеленгендерде ($8,24 \pm 0,72$, $p < 0,01$) нақты деңгейде төмендеген. Бұл ГлР ферментінің қалпына келтіру және антиоксиданттық қорғаныстағы рөлінің әлсіреуін көрсетеді.

Кесте 4

Зерттелген тәжірибелік жануарлардағы АОЖ ферменттері белсенділігінің өзгерісі

	Зерттеу нысаны	I-бақылау	II-ҚД2	III-сәулелену	IV-ҚД2+сәулелену
ГлР	Ұйқы безі	$28,15 \pm 2,56$	$23,24 \pm 2,03$	$21,34 \pm 1,81$ *	$21,17 \pm 1,56$ *
	Лимфоцит	$13,14 \pm 0,97$	$10,33 \pm 0,81$ *	$8,18 \pm 0,63$ **	$8,24 \pm 0,72$ **
ГлП	Ұйқы безі	$158,24 \pm 10,17$	$143,26 \pm 12,37$	$138,26 \pm 12,37$	$126,55 \pm 11,59$ *
	Лимфоцит	$422,66 \pm 30,42$	$375,39 \pm 28,34$	$347,24 \pm 21,75$ *	$333,11 \pm 19,45$ *
КТ	Ұйқы безі	$67,63 \pm 5,22$	$54,06 \pm 4,26$ *	$58,34 \pm 4,36$	$51,33 \pm 4,64$ *
		$88,22 \pm 6,27$	$72,11 \pm 4,37$ *	$67,43 \pm 4,15$ *	$67,96 \pm 4,22$ *

Ескерту: бақылау топпен салыстырғанда нақты: *- $p < 0,05$, **- $p < 0,01$.

ГлП-ның ұйқы безіндегі белсенділігі бақылау тобында $158,24 \pm 10,17$ болса, тәжірибелік топтарда азаюы байқалды: диабет кезінде $143,26 \pm 12,37$ ($p > 0,05$), сәулеленген топта $138,26 \pm 12,37$ ($p > 0,05$), диабет пен сәулеленген топта $126,55 \pm 11,59$ ($p < 0,05$). Қан лимфоциттерінде ГлП белсенділігі де бақылаудағы көрсеткішпен ($422,66 \pm 30,42$) салыстырғанда төмендеген: диабет кезінде $375,39 \pm 28,34$ ($p > 0,05$), сәулеленген топта $347,24 \pm 21,75$ ($p < 0,05$), ал қосарлы әсер кезінде $333,11 \pm 19,45$ ($p < 0,05$) болғаны анықталды. Бұл пероксидтерді ыдырату қабілетінің төмендеуіне және оксидативті зақымданудың күшеюіне алып келеді. КТ ферменті ұйқы безінде бақылау тобында $67,63 \pm 5,22$ болса, диабет кезінде $54,06 \pm 4,26$ ($p < 0,05$), сәулеленген топта $58,34 \pm 4,36$ ($p > 0,05$), ал қосарлы әсер кезінде $51,33 \pm 4,64$ ($p < 0,05$) болғаны тіркелді. Қан лимфоциттерінде КТ белсенділігі бақылаумен ($88,22 \pm 6,27$) салыстырғанда барлық тәжірибелік топтарда нақты төмендеген: диабет кезінде $72,11 \pm 4,37$, сәулеленген топта $67,43 \pm 4,15$ және қосарлы әсер кезінде $67,96 \pm 4,22$ (барлығы $p < 0,05$). Каталаза сутегі пероксидін бейтараптауда маңызды фермент болғандықтан, оның төмендеуі жасушалық токсиндердің жиналуына мәжбүрлейді.

Бұл көрсеткіштер антиоксиданттық жүйенің ферменттік белсенділігінің қант диабеті мен радиациялық әсердің ықпалынан айтарлықтай төмендегенін және қосарлы әсер кезінде бұл өзгерістердің күшейетінін білдіреді. Мұндай фермент белсенділігінің төмендеуі оксидативті күйзелістің артуына және жасуша зақымдануларына ықпал етеді. Жалпы, ферменттердің белсенділігінің төмендеуі қант диабеті мен радиациялық әсердің организмдегі оксидативті күйзеліс деңгейін күшейтетінін және антиоксиданттық қорғаныс механизмдерінің бұзылуын көрсетеді. Әсіресе, диабет пен радиацияның қосарлы әсері ферменттік белсенділіктің ең төменгі деңгейіне дейін жетуі организмнің антиоксиданттық потенциалының күрделі зақымдануына алып келуі мүмкін. Бұл жағдай жасушалардың зақымдануы мен олардың қызметінің бұзылуына әкеп соғып, патологиялық процестердің асқынуына ықпал етуі мүмкін.

Талқылау

Алынған деректер стрептозотоцинмен индуцирленген 2 типті қант диабеті мен иондаушы сәулелену жеке әсер еткенде де метаболикалық бұзылыстар тудыратынын көрсетті. Бұл бұзылыстар гипергликемия және инсулин секрециясының өзгерістерімен сипатталады. Алайда бұл факторлардың қосарлы әсері кезінде анағұрлым айқын патологиялық өзгерістерге алып келген, бұл диабеттік жағдай бар кезде радиациялық фактордың күшейткіш әсері бар екенін дәлелдейді. Стрептозотоцин-индукцияланған 2 типті қант диабеті және иондаушы сәулеленудің әсері, әсіресе олардың қосарлы кезі тәжірибелік егеуқұйрықтардың иммундық статусында айқын өзгерістерге әкелген. Барлық тәжірибелік топтарда (II–IV) бақылау топпен салыстырғанда лейкоциттердің жалпы санының нақты төмендеуі байқалды ($p < 0,05$), бұл ағзадағы қан түзілуінің тежелуін және ағзаның иммундық төзімділігінің төмендеуін көрсететті. Сонымен бірге лимфоциттер және супопуляцияларының абсолютті көрсеткіштері төмендеді. CD3+ популяциясында өзгерістер туындады: олардың абсолюттік саны барлық тәжірибелік топтарда нақты түрде төмендеді, өте жоғары нақтылықпен өзгеріске түскен диабет 2 және сәулеленудің қосарлы әсері кезінде болғаны тіркелді ($1,18 \pm 0,07 \times 10^9/\text{л}$ шамада).

болса, бақылау тобында $1,58 \pm 0,09 \times 10^9/\text{л}$ болды, $p < 0,05$). Сонымен бірге, CD4+ абсолютті және салыстырмалы құрамының төмендеуі де байқалды, ал IV топта төмендеуі нақты түрде жоғары дәрежеге жеткен ($p < 0,01$). Бұл иммундық жасушалардың кооперативті белсенділігінің тежелуін және тиімді иммундық жауапты қалыптастыру қабілетінің төмендеуін көрсететті. CD8+ санының азаюы да жүрген, бірақ қарқындылығы CD4+ лимфоциттеріне қарағанда шамалы болғаны тіркелді. CD19+ келетін болсақ, диабеті бар топта олардың санында өсу үрдісі байқалды, ал сәулеленген топта және екі фактордың қосарлы әсер ету кезінде олардың деңгейі нақты болмаса да төмендеген, бұл жасушалық иммунитеттің бұзылуына гуморальдық бөлімнің компенсациялық байланысын көрсетуі мүмкін. ЛМТР көрсеткішінің жоғарылауы, әсіресе II–IV топтарда, диабеттік метаболикалық өзгеріс аясында және радиациялық күйзелістің әсерінен иммунокомпетентті жасушалардың дәрменсіздігін көрсетті. Бұл НКТ-тест деректері бойынша фагоциттердің функционалдық белсенділігінің төмендеуімен де расталды ($p < 0,01$). Тәжірибелік топтардағы АИК концентрациясының төмендеуі иммундық белсенділіктің тежелуінің тағы бір көрсеткішпен расталып тұр.

Жоғарыда келтірілген мәліметтер диабеттік метаболикалық күйзеліс пен радиациялық әсерінде, әсіресе олардың қосарлы ықпалында иммундық жүйеде нақты елеулі тежелу құбылыстарының жүргенін дәлелдейді. Бұл өзгерістер клеткалық иммунитеттің әлсіреуімен, фагоциттік функциялардың бұзылуымен және реттегіш Т-жасушаларының дисбалансымен сипатталуы мүмкін. Тәжірибе түрінде алынған үлгі метаболикалық аурулардағы иммундық бұзылулардың патогенезін одан әрі зерттеуге, сондай-ақ иммуномодуляциялық және радиопротекторлық агенттердің тиімділігін бағалауға ғылыми ықпалын тудырады. Радиациялық фонның жоғарылау қаупі бар аумақтарда тұратын диабеті бар адамдарда иммундық жүйенің лимфоциттік буынының тежелуі және нейтрофилдердің белсенділігінің тежелуі мүмкіндігі бар деп болжауға болады. Мұны диагностикалық-профилактикалық деңгейде атқарылатын жұмыстарда ескеру қажеттігін көрсетеді.

Липидтердің асқын тотығы өнімдері организмдегі тотығу күйзелісінің деңгейін және жасушалық мембраналардың зақымдану дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді. Тәжірибе мәліметтерінде диабет кезінде ДК мен МДА деңгейінің нақты түрде жоғарылауы байқалды ($p < 0,05$). Бұл созылмалы гипергликемия жағдайында пайда болатын эндогендік активті оттегі түрлерінің артық түзілуімен және антиоксиданттық жүйенің әлсіреуімен байланысты болуы мүмкін. Сәулеленген жануарларда (III топ) бұл көрсеткіштер одан әрі артты ($p < 0,01$), бұл иондаушы сәулеленудің тікелей прооксиданттық әсерін және липидтік мембраналарға зақым келтіретін бос радикалдық процестердің белсенділігі арта түскенін көрсетеді. Ең жоғары мәндер IV топта тіркелді: ДК мен МДА деңгейлері ұйқыбезде де, лимфоциттерде де нақты артқан ($p < 0,001$). Бұл жағдай қосарланған зақымдаушы факторлардың кумулятивтік және синергиялық әсерін көрсетеді. ЛАТ өнімдерінің шамадан тыс артуы жасушаларда терең биохимиялық және құрылымдық зақымданулардың дамуын, антиоксиданттық қорғаныс механизмдерінің әлсіреуін және тотығу-тотықсыздану гомеостазының бұзылуын дәлелдейтіні анық. Жалпы, алынған нәтижелер диабет пен ү-сәулеленудің әрқайсысы жеке, сондай-ақ қосарласу кезінде, ЛАТ үдерісін біршама күшейтетінін көрсетеді. Бұл құбылыс ұлпа деңгейінде жасушалық бұзылыстар мен патофизиологиялық өзгерістердің дамуына әкеліп соғады. Мұндай

жағдайларда антиоксиданттық қорғанысты қалпына келтіру бағытындағы терапияның қажеттілігі анық көрінеді.

Эксперименттегі антиоксиданттық жүйе ферменттерінің белсенділігіне келетін болсақ, ГлР белсенділігі ұйқы безінде және лимфоциттерде диабеті бар, сәулеленген және қосарлы әсер алған жануарларда айтарлықтай төмендеді ($p<0,01$), бұл тіндер мен қан жүйесінде қалпына келтіру қабілетінің әлсіреуін және оксидативті күйзелістің күшеюін көрсетеді. ГлП белсенділігі ұйқы безінде негізінен қосарлы әсер топтарында төмендеді ($p<0,05$), ал қан лимфоциттерінде - сәулеленген және қосарлы әсер алған топтарда ($p<0,05$) төмендеу анықталды. Бұл ферментативтік антиоксиданттық қорғаныс деңгейінің әлсіреуін көрсетті, нәтижесінде пероксидтік қосылыстардың жиналуы мен клеткалық құрылымдардың зақымдалуы артуы мүмкін. КТ – сутегі пероксидін ыдырататын фермент – ұйқы безінде диабеті бар және қосарлы әсер топтарында ($p<0,05$), ал лимфоциттерде барлық тәжірибелік топтарда ($p<0,05$) нақты төмендеген. Бұл клеткалардың детоксикациялық қабілетінің төмендеуін және оксидативті зақымданудың күшеюін білдіреді. Сонымен, антиоксиданттық жүйе ферменттерінің белсенділігінің өзгерістері диабеті бар және радиациялық әсер алған жануарларда оксидативті күйзеліс деңгейінің жоғары екенін көрсетеді, ал қосарлы патологияда АОЖ-нің күрделі әлсіреуін дәлелдейді. Бұл мультифакторлық әсерлер жағдайында антиоксиданттық жүйенің жағдайын кешенді бағалаудың маңыздылығын және оксидативті күйзелісті түзетуге арналған тиімді шараларды әзірлеу қажеттігін көрсетеді.

Қорытынды

Диабет пен иондаушы сәулеленудің жекелей әсерінен туындаған метаболикалық бұзылыстармен салыстырғанда, олардың қосарлы ықпалы организмде неғұрлым терең патологиялық өзгерістерге алып келгені анықталды. Бұл ретте, диабеттік күй аясында радиациялық фактордың метаболикалық бұзылыстарды күшейту ықпалы анағұрлым жоғары болған.

Екі фактордың қосарлы әсері тәжірибелік жануарлардың иммундық жүйесіне де айтарлықтай теріс ықпал көрсетті, бұл олардың зақымдаушы әсерінің синергиялық сипатын дәлелдеді. Бұл жалпы лейкоциттер санының, Т-лимфоциттер, Т-хелперлер мөлшерінің, сондай-ақ иммунорегуляторлық индексінің төмендеуімен сипатталды. НКТ-тест нәтижелері фагоцитоз процесінің бәсеңдегені, АИК деңгейінің төмендеуі иммунитеттің спецификалық және бейспецификалық буындарының тежелуін айғақтады.

Диабет пен сәулеленудің қосарлы әсері кезінде ЛАТ өнімдерінің деңгейі ең жоғары көрсеткіштерге жетіп, антиоксиданттық қорғаныс жүйесінің нақты бұзылғанын болжауға болады. Бұл патологиялық өзгерістер жасушалардың зақымдануын күшейтіп, аурулардың өршуіне ықпал етеді. Сондықтан, мультифакторлық патология жағдайында антиоксиданттық терапияны қолдану тиімді әрі қажетті екені дәлелденді.

Авторлардың үлесі

О.З. – мақаланы қорытындылау, әдіс-тәсілдерді бекіту, мақала мәтінін жазу; **К.В.** – тұжырымдамалау, мақаланы сыни тұрғыдан қайта қарау; **Д.Е.** – иммунологиялық өзгерістерге тұжырымдама; **Г.М.** – метаболикалық өзгерістерге тұжырымдама; **Г.О.** –

биохимиялық өзгерістерге тұжырымдама; **Ж.П.** – өзектілігіне әдеби шолу, әдіснаманы дайындау.

Қаржыландыру:

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP19677010).

Мүдделер қақтығысы

Барлық авторлар мақаланың мазмұнын оқып танысқан және мүдделер қақтығысы жоқ.

Этикалық нормаларды сақтау

Жануарларға жүргізілген зерттеулерде барлық рәсімдер этикалық нормаларына («Астана медицина университеті» АҚ-ның жергілікті этика комитетінде қаралып, зерттеу жұмысына рұқсат берілді, хаттама №8, 2022 ж 25 қараша), сонымен қатар ҚР және халықаралық ұйымдардың бекітілген нормативтік құқықтық актілеріне сәйкес келеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Дедов ИИ, Шестакова МВ. Сахарный диабет: Руководство для врачей. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2023;456.
2. American Diabetes Association. Standards of Medical Care in Diabetes, - 2024. Diabetes Care. 2024;47:1-212. doi.org/10.2337/dc24-S001diabetesjournals.org+5
3. Tomic D, Shaw JE, Magliano DJ. The burden and risks of emerging complications of diabetes mellitus. Nat. Rev. Endocrinol. 2022;18:525–39. doi.org/10.1038/s41574-022-00690-7
4. Chen Y, Huang R, Mai Z, Chen H, Zhang J, Zhao L, Yang Z, Yu H, Kong D, Ding Y. Association between systemic immune-inflammatory index and diabetes mellitus: mediation analysis involving obesity indicators in the NHANES. Front Public Health. 2024;11:1331159. doi.org/10.3389/fpubh.2023.1331159
5. Esser N., Legrand-Poels S., Piette J, Scheen AJ, Paquot N. Inflammation as a Link between Obesity, Metabolic Syndrome and Type 2 Diabetes. Diabetes Research and Clinical Practice. 2014;105:141-50. doi.org/10.1016/j.diabres.2014.04.006
6. Todd JA. Etiology of Type 1 Diabetes. Immunity. 2010;32(4):457-67. doi.org/10.1016/j.immuni.2010.04.001
7. Ткачук ВА, Воротников АВ. Молекулярные механизмы развития резистентности к инсулину. Сахарный диабет. 2014;2:29-40. doi.org/10.14341/DM2014229-40
8. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 2. Diagnosis and Classification of Diabetes: Standards of Care in Diabetes-2024. Diabetes Care. 2024;47:20-42. doi.org/10.2337/dc24-S002
9. Дубинина ЕЕ, Шугалей ИВ. Окислительная модификация белков. Успехи современной биологии 1993;113(1):71–81.
10. Ilderbayev O, Okassova A, Rakhzyhanova S, Ilderbayeva G, Zhazykbayeva L. The levels of oxidative stress in a combination of stress factors. Journal of Medicine and Life. 2022;8:927–931. doi.org/10.25122/jml-2021-0060
11. Комиссарова ИВ. Свободнорадикальное окисление и антиоксидантная защита при эндокринных заболеваниях. СПб.: СпецЛит; 2020.

12. Сорокина ОА. Механизмы антиоксидантной защиты и их нарушения при диабете. Вестник клинической медицины. 2020;1:30–4. doi.org/10.26442/2077-5638.2020.1.000302
13. Barquinero JF, Fattibene P, Chumak V, et al. Lessons from past radiation accidents: Critical review of methods addressed to individual dose assessment of potentially exposed people and integration with medical assessment. Environ Int. 2021;146:106175. doi.org/10.1016/j.envint.2020.106175
14. Yoshida T, Goto S, Kawakatsu M, Urata Y, Li TS. Mitochondrial dysfunction, a probable cause of persistent oxidative stress after exposure to ionizing radiation. Free Radic Res. 2012;46(2):147-53. doi.org/10.3109/10715762.2011.645207.
15. World Medical Association. Declaration of Helsinki. Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subject. UMS; 2002: p.42–6.
16. Clausen J. Migration inhibition of human leukocytes mixed with phytohemagglutinin-preincubated mononuclear leukocytes. Acta Allergol. 1975;30(5):239–49. doi.org/10.1111/j.1398-9995.1975.tb00200.x
17. Jin X, Li D, Quan W, et al. Leaky gut, circulating immune complexes, arthralgia, and arthritis in IBD: coincidence or inevitability? Front Immunol. 2024;20(15):1347901. doi.org/10.3389/fimmu.2024.1347901
18. Damle V, Wu K, Arouri D, et al. Detecting free radicals post viral infections. Free Rad Biol Med. 2022;191:8–23. doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.08.013
19. Гаврилов ВБ, Мишкорудная МИ. Спектрофотометрическое определение содержания гидроперекисей липидов в плазме крови. Лабораторное дело. 1983;3:33-6.
20. Конюхова СГ, Маркин СГ, Конюхова АА, Федорова ТН. Перекисное окисление липидов и методы определения продуктов липопероксидации в биологических средах. Лабораторное дело. 1989;9:40-6.
21. Власова СН, Шабунина ЕИ, Переслегина ИА. Активность глутатионзависимых ферментов эритроцитов при хронических заболеваниях печени у детей. Лабораторное дело. 1990;8:19-22.
22. Королюк МА, Иванова ЛИ, Майорова НО, Токарев ВЕ. Метод определения активности каталазы. Лабораторное дело. 1988;1:16-9. Available from: <https://europepmc.org/article/MED/2451064>
23. Ananieva T, Chorna V. Radiobiology with bases of agricultural radioecology. Dnipro: Lira. 2022. Available from: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7282>
24. Li W, Li T, Zhao C, et al. XiaoEr LianHuaQinGan alleviates viral pneumonia in mice infected by influenza A and respiratory syncytial viruses. Pharm Biol. 2022;60(1):2355-66. doi.org/10.1080/13880209.2022.2147961
25. Koecke M, Strecker J, Straeten F, et al. Inhibition of leukocyte migration after ischemic stroke by VE-cadherin mutation in a mouse model leads to reduced infarct volumes and improved motor skills. Brain Behav. 2024;14(3):e3449. doi.org/10.1002/brb3.3449
26. Javed A, Mehboob K, Rashid A, et al. Oxidative Stress and Lipid Peroxidation in NAFLD with and without Type 2 Diabetes Mellitus. J Coll Physicians Surg Pak. 2023;33(11):1254-58. doi.org/10.29271/jcsp.2023.11.1254
27. Mrowicka M. Procesy wolnorodnikowe W cukrzycy [Free-radical reactions in diabetes mellitus]. Pol Merkur Lekarski. 2005;9(112):571-6. <https://publicum.umed.lodz.pl/info/article/AML4baf073775f44f889df25e228e649a9a/> [in Polish]
28. Marjani A. Lipid peroxidation alterations in type 2 diabetic patients. Pak J Biol Sci. 2010;13(15):723-30. doi.org/10.3923/pjbs.2010.723.730
29. Likidililid A, Patchanans N, Peerapatdit T, Sriratanasathavorn C. Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in erythrocytes of type 2 diabetic patients. J Med Assoc Thai. 2010;93(6):682-93. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20572373/>

30. Davì G, Falco A, Patrono C. Lipid peroxidation in diabetes mellitus. *Antioxid Redox Signal*. 2005;7(1-2):256-68. doi.org/10.1089/ars.2005.7.256

Изучение влияния ионизирующего излучения на течение стрептозотоцинового диабета путем анализа иммунологического и биохимического состояния крыс

О.З. Ильдербайев^{*1}, К.В. Мутиг², Д.Е. Узбеков¹, Г.М. Жармаханова³, Г.О. Ильдербайева¹, Ж.П. Сембаева¹

¹*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан*

²*Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Москва, Россия*

³*Западно-Казахстанский медицинский университет имени М. Оспанова, Актобе, Казахстан*

Аннотация. В настоящем исследовании изучены индивидуальные и комбинированные эффекты стрептозотоксин-индуцированного сахарного диабета 2 типа и ионизирующего γ -излучения на организм крыс. Оценивалась динамика метаболических, иммунологических и биохимических показателей. Установлено, что каждый из факторов - как стрептозотоксин, так и γ -излучение - вызывал гипергликемию, снижение секреции инсулина и ослабление антиоксидантной защиты. При их совместном воздействии эти патологические изменения усиливались: значительно возрастали уровни глюкозы и продуктов перекисного окисления липидов, отмечалось снижение инсулина. Выявлены выраженные нарушения со стороны иммунной системы: снижение числа лейкоцитов, Т-лимфоцитов, Т-хелперов, иммунорегуляторного индекса, ослабление фагоцитоза и снижение уровня циркулирующих иммунных комплексов. Наиболее выраженные эффекты наблюдались при комбинированном воздействии, что указывает на синергетический характер повреждающего действия стрептозотоксина и γ -излучения. Полученные данные свидетельствуют о высокой информативности данной экспериментальной модели для изучения патогенеза метаболически и радиационно-обусловленного иммунодефицита, а также для оценки эффективности иммуномодулирующих и радиопротекторных препаратов.

Ключевые слова: сахарный диабет 2 типа, стрептозотоксин, γ -излучение, метаболизм, иммунитет, оксидативный стресс

Investigation of the effect of ionizing radiation on the course of streptozotocin-induced diabetes through the analysis of immunological and biochemical status in rats

O.Z. Ilderbayev^{*1}, K.V. Mutig², D.E. Uzbekov¹, G.M. Zharmakhanova³, G.O. Ilderbayeva¹, Zh.P. Sembayeva¹

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²*I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia*

³*West Kazakhstan Medical University named after Marat Ospanov, Aktobe, Kazakhstan*

Abstract. This study investigated the individual and combined effects of streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus and ionizing γ -radiation on the rat organism. The dynamics of metabolic,

immunological, and biochemical parameters were evaluated. It was found that each factor independently induced pathological changes, including hyperglycemia, reduced insulin secretion, and impaired antioxidant defense. Under combined exposure, these effects were significantly exacerbated: elevated blood glucose and lipid peroxidation products, along with a decline in insulin levels, were observed. Pronounced immune dysfunctions were recorded, including reductions in leukocyte count, T-lymphocytes, T-helper cells, and the immunoregulatory index, as well as suppressed phagocytic activity and decreased levels of circulating immune complexes. The most profound alterations occurred under combined action, indicating a synergistic damaging effect of streptozotocin and γ -radiation. These findings support the utility of this experimental model for investigating the pathogenesis of metabolically and radiation-induced immunodeficiency and for evaluating the efficacy of immunomodulatory and radioprotective agents.

Keywords: type 2 diabetes mellitus, streptozotocin, γ -radiation, metabolism, immunity, oxidative stress

References

1. Dedov II, Shestakova MV. Diabetes Mellitus: A Guide for Physicians. - Moscow: GEOTAR-Media, 2023;456. [in Russian]
2. American Diabetes Association. Standards of Medical Care in Diabetes, - 2024. Diabetes Care. 2024;47:1–212. doi.org/10.2337/dc24-S001diabetesjournals.org+5
3. Tomic D, Shaw JE, Magliano DJ. The burden and risks of emerging complications of diabetes mellitus. Nat. Rev. Endocrinol. 2022;18:525–39. doi.org/10.1038/s41574-022-00690-7
4. Chen Y, Huang R, Mai Z, et al. Association between systemic immune-inflammatory index and diabetes mellitus: mediation analysis involving obesity indicators in the NHANES. Front Public Health. 2024;11:1331159. doi.org/10.3389/fpubh.2023.1331159
5. Esser N, Legrand-Poels S, Piette J, Scheen AJ, Paquot N. Inflammation as a Link between Obesity, Metabolic Syndrome and Type 2 Diabetes. Diabetes Research and Clinical Practice. 2014;105:141-50. doi.org/10.1016/j.diabres.2014.04.006
6. Todd. J.A. Etiology of Type 1 Diabetes. Immunity. 2010;32(4):457-67. doi.org/10.1016/j.immuni.2010.04.001
7. Tkachuk VA, Vorotnikov AV. Molecular mechanisms of development of insulin resistance. Diabetes mellitus. 2014;2:29-40. doi.org/10.14341/DM2014229-40 [in Russian]
8. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 2. Diagnosis and Classification of Diabetes: Standards of Care in Diabetes-2024. Diabetes Care. 2024;47:20-42. doi.org/10.2337/dc24-S002
9. Dubinina EE, Shugaley IV. Oxidative modification of albumens. Successes of Modern Biology. 1993;113(1):71-81. [in Russian]
10. Ilderbayev O, Okassova A, Rakhyzhanova S, Ilderbayeva G, Zhazykbayeva L. The levels of oxidative stress in a combination of stress factors. Journal of Medicine and Life. 2022;8:927–31. doi.org/10.25122/jml-2021-0060
11. Komissarova IV. Free Radical Oxidation and Antioxidant Defense in Endocrine Diseases. - St. Petersburg: SpetsLit, 2020. [in Russian]
12. Sorokina OA. Mechanisms of Antioxidant Defense and Their Impairment in Diabetes. Bulletin of Clinical Medicine. 2020;1:30–4. doi.org/10.26442/2077-5638.2020.1.000302 [in Russian]
13. Barquinero JF, Fattibene P, Chumak V, et al. Lessons from past radiation accidents: Critical review of methods addressed to individual dose assessment of potentially exposed people and integration with medical assessment. Environ Int. 2021;146:106175. doi.org/10.1016/j.envint.2020.106175

14. Yoshida T, Goto S, Kawakatsu M, Urata Y, Li TS. Mitochondrial dysfunction, a probable cause of persistent oxidative stress after exposure to ionizing radiation. *Free Radic Res.* 2012;46(2):147-53. doi.org/10.3109/10715762.2011.645207.
15. World Medical Association. Declaration of Helsinki. Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subject. UMS; 2002: p.42-6.
16. Clausen, J. Migration inhibition of human leukocytes mixed with phytohemagglutinin-preincubated mononuclear leukocytes. *Acta Allergol.* 1975;30(5):239-49. doi.org/10.1111/j.1398-9995.1975.tb00200.x
17. Jin X, Li D, Quan W, et al. Leaky gut, circulating immune complexes, arthralgia, and arthritis in IBD: coincidence or inevitability? *Front Immunol.* 2024;20(15):1347901. doi.org/10.3389/fimmu.2024.1347901
18. Damle V, Wu K, Arouri D, et al. Detecting free radicals post viral infections. *Free Rad Biol Med.* 2022;191:8-23. doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.08.013
19. Gavrilov VB, Mishkorudnaya MI. Spectrophotometric determination of lipid hydroperoxides in blood plasma. *Laboratornoe delo.* 1983;3:33-6. [in Russian]
20. Konyukhova SG, Markin SG, Konyukhova AA, Fedorova TN. Lipid peroxidation and methods for determining lipoperoxidation products in biological media. *Laboratornoe delo.* 1989;9:40-6. [in Russian]
21. Vlasova SN, Shabunina EI, Pereslegina IA. Activity of glutathione-dependent enzymes of erythrocytes in chronic liver diseases in children. *Laboratornoe delo.* 1990;8:19-22. [in Russian]
22. Korolyuk MA, Ivanova LI, Mayorova NO, Tokarev VE. Method for determining catalase activity. *Laboratornoe delo.* [Internet]. 1988;1:16-9. Available from: <https://europepmc.org/article/MED/2451064> [in Russian]
23. Ananieva T, Chorna V. Radiobiology with bases of agricultural radioecology. Dnipro: Lira. [Internet]. 2022. Available from: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7282>
24. Li W, Li T, Zhao C, et al. XiaoEr LianHuaQinGan alleviates viral pneumonia in mice infected by influenza A and respiratory syncytial viruses. *Pharm Biol.* 2022;60(1):2355-66. doi.org/10.1080/13880209.2022.2147961
25. Koecke M, Strecker J, Straeten F, et al. Inhibition of leukocyte migration after ischemic stroke by VE-cadherin mutation in a mouse model leads to reduced infarct volumes and improved motor skills. *Brain Behav.* 2024;14(3):e3449. doi.org/10.1002/brb3.3449
26. Javed A, Mehboob K, Rashid A, et al. Oxidative Stress and Lipid Peroxidation in NAFLD with and without Type 2 Diabetes Mellitus. *J Coll Physicians Surg Pak.* 2023;33(11):1254-58. doi.org/10.29271/jcpsp.2023.11.1254
27. Mrowicka M. Procesy wolnorodnikowe W cukrzycy [Free-radical reactions in diabetes mellitus]. *Pol Merkur Lekarski.* 2005;9(112):571-6. <https://publicum.umed.lodz.pl/info/article/AML4baf073775f44f889df25e228e649a9a/> [in Polish]
28. Marjani A. Lipid peroxidation alterations in type 2 diabetic patients. *Pak J Biol Sci.* 2010;13(15):723-30. doi.org/10.3923/pjbs.2010.723.730
29. Likidilid A, Patchanans N, Peerapatdit T, Sriratanasathavorn C. Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in erythrocytes of type 2 diabetic patients. *J Med Assoc Thai.* 2010;93(6):682-93. PMID: 20572373 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20572373/>
30. Davi G, Falco A, Patrono C. Lipid peroxidation in diabetes mellitus. *Antioxid Redox Signal.* 2005;7(1-2):256-68. doi.org/10.1089/ars.2005.7.256

Авторлар туралы мәлімет:

Ильдербаев Оралбек Зайнулданович – хат-хабар авторы, медицина ғылымдарының докторы, профессор, жалпы биология және геномика кафедрасының меңгерушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Мутиг Керим Валентинович – PhD, профессор, фармакология кафедрасының профессоры, И.М. Сеченов атындағы Бірінші Мәскеу мемлекеттік медицина университеті, Большая Приоговская көшесі, 2, 119435, Мәскеу, Ресей.

Узбеков Дархан Есенгалиевич – PhD, қауымдастырылған профессор, жалпы биология және геномика кафедрасының доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Жармаханова Гүлмира Махамбетьярқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, жаратылыстану пәндері кафедрасының жетекшісі, М. Оспанов атындағы Батыс Қазақстан медицина университеті, Маресьев көшесі, 68, 030019, Ақтөбе, Қазақстан.

Ильдербаева Гульжан Оралбековна – PhD, қауымдастырылған профессор, биотехнология және микробиология кафедрасының доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Сембаева Жібек Пернебекқызы – биология ғылымдарының кандидаты, жалпы биология және геномика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Информация об авторах:

Ильдербаев Оралбек Зайнулданович – автор-корреспондент, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Мутиг Керим Валентинович – PhD, профессор, профессор кафедры фармакологии, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, ул. Большая Пироговская, 2, 119435, Москва, Россия.

Узбеков Дархан Есенгалиевич – PhD, ассоциированный профессор, доцент кафедры общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Жармаханова Гүлмира Махамбетьяровна – PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой естественнонаучных дисциплин, Западно-Казахстанский медицинский университет им. М. Оспанова, ул. Маресьева, 68, 030019, Актөбе, Казахстан.

Ильдербаева Гульжан Оралбековна – PhD, ассоциированный профессор, доцент кафедры биотехнологии и микробиологии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Сембаева Жибек Пернебековна – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры общей биологии и геномики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Information about the authors:

Ilderbayev Oralbek – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street, 13, 010008, Astana, Kazakhstan.

Mutig Kerim – PhD, Professor, Department of Pharmacology, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Bolshaya Pirogovskaya Street, 2, 119435, Moscow, Russia.

Uzbekov Darkhan – PhD, Associate Professor, Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street, 13, 010008, Astana, Kazakhstan.

Zharmakhanova Gulmira – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Natural Sciences, M. Ospanov West Kazakhstan Medical University, Maresyev Street, 68, 030019, Aktobe, Kazakhstan.

Ilderbayeva Gulzhan – PhD, Associate Professor, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street, 13, 010008, Astana, Kazakhstan.

Sembayeva Zhibek – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of General Biology and Genomics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street, 13, 010008, Astana, Kazakhstan.



IRSTI 06.81.23
Research article

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-39-55>

Implementation of multiphoton intravital microscopy in mesenteric and coronary artery research

A.A. Rakhymzhan¹, A.N. Aralbaeva¹, S. Guner², Z.D. Dushimova¹, T.A. Akhayeva^{1*},
A.M. Seitaliyeva¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Yuksekk Ihtisas University, Ankara, Turkey

Abstract. Advancements in intravital imaging technologies, particularly multiphoton microscopy, have significantly improved our ability to visualize and understand the dynamic interactions within vascular structures and various cell types in real time. However, traditional *in vitro* techniques – such as isometric myography – remain standard tools for assessing vascular reactivity. This study aims to develop and integrate both *in vivo* and *in vitro* methodologies to evaluate the functional and structural states of smooth muscle and endothelial layers in mesenteric vessels at the cellular level. Using native microscopy techniques, we assess morphological changes and correlate them with pharmacological responses in both mesenteric and coronary arteries. A key objective is to compare the capabilities and limitations of isometric myography and advanced multiphoton microscopy in analyzing vascular contractility and relaxation responses. The combined use of these techniques is expected to increase data quality, reduce animal usage, and support longitudinal studies. This integrative approach also enables the evaluation of both acute and chronic effects of pharmacological agents under near-physiological conditions, offering a more comprehensive understanding of vascular function.

Keywords: isometric measurements, mesenteric artery, intravital multi-photon microscopy, endothelial cells, transgenic mouse

Introduction

In the contemporary scientific world, the integration of various research approaches and technologies plays a key role in achieving significant results. The use of advanced technologies, such as multiphoton microscopy, will open new possibilities for studying dynamic processes with live cells in their natural environment – living tissues of the organism. This will significantly enhance the value of the experiments conducted, allowing for a deeper understanding of biological mechanisms and processes.

Current research methods help explain physiological and pathological alterations in the regulation of vascular balance.

Received: 18.07.2025. Accepted: 30.09.2025. Available online: 30.09.2025.

*Corresponding author: t.akhayeva@gmail.com

There are two major approaches to studying vascular imbalance: one involves measuring isometric and pressure-induced contractility properties, while the other assesses the relaxation abilities of blood vessels. Pharmacology plays a key role in vascular research, as it enables the use of various stimulants and inhibitors that target different receptors and mechanisms.

Changes in arterial contractility determine arterial resistance, which can increase in atherosclerosis. Additionally, hypertension remains a major pathological condition, where alterations in vascular mechanisms contribute to disease progression, with both age and genetics playing significant roles [1].

The question of atherosclerosis development mechanisms and the involvement of various cellular and molecular regulatory pathways remains relevant despite technological advancements and modern methods. New methods for studying the functional activity of cells in and around the vascular wall will make it possible to accurately study the pathogenesis of various cardiovascular diseases, such as atherosclerosis, for more effective prevention and treatment [2-6].

Vascular reactivity of the segment is measured under isometric conditions through a highly sensitive and accurate transducer. The opposite side is attached to a precision micrometer, allowing control of the vessel circumference.

The microscopic method enables the observation of anatomical changes occurring within minutes during the development of an effect by capturing the activation process at a specific moment.

Meanwhile, pharmacological methods help record contractile activity in response to various agents, providing insights into both pathological and physiological conditions.

Vascular reactivity of the segment is measured under isometric conditions using a highly sensitive and accurate transducer, while the opposite side is attached to a precision micrometer for controlled adjustments of vessel circumference. The opposite side is attached to a precision micrometer, allowing control of the vessel circumference. The segment is kept under physiological conditions. contains up to 8ml of physiological salt solution (PSS), where the temperature is maintained via the built-in heating. Gas inflow is individually controlled and easily regulated by a needle valve (Figure 1).

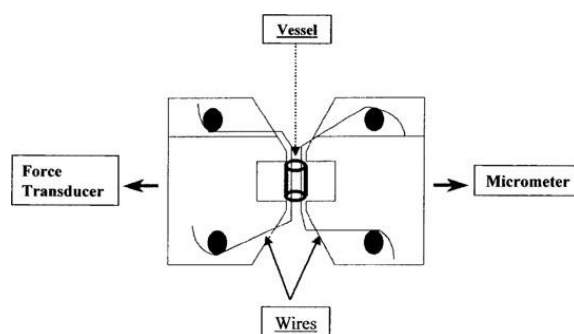


Figure 1. Myograph DMT 620 [11]

Simultaneously, a high-resolution microscopic method allows real-time observation of anatomical and structural changes, capturing dynamic alterations at the cellular level during the development of vascular responses. This combined approach enables the assessment of contractile activity in response to pharmacological agents, providing insights into both physiological and pathological conditions. By integrating mechanical, microscopic, and pharmacological analyses, this method offers a comprehensive evaluation of vascular function and remodeling.

Wire myography is an *in vitro* technique used to assess the functional responses and vascular reactivity of isolated small resistance arteries. This method enables the examination of vessels from various species, including transgenic models, across different vascular beds and pathological conditions [7-11].

In recent decades, intravital two-photon microscopy has become a modern method for visualizing cellular responses in live animals and has found particular applications in neurobiology and immunology [2-6, 12-13]. Two-photon microscopy allows for the visualization of cell dynamics in their natural *in vivo* environment (Figure 2). The use of advanced technologies, such as two-photon microscopy, enables the identification of complex spatiotemporal dynamic interactions among different cell types (e.g., endothelial cells, T-lymphocytes, and macrophages) involved in inflammation and atherogenesis [3-4,14].

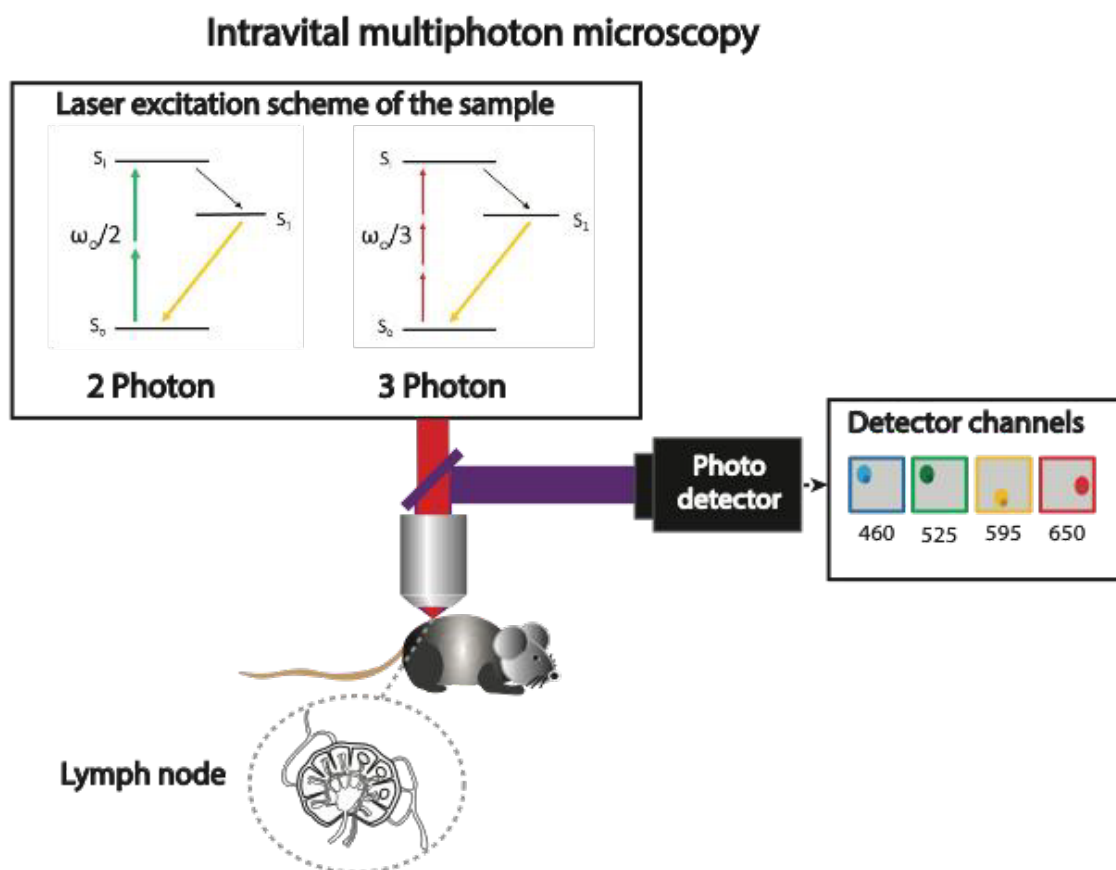


Figure 2. A diagram of intravital multiphoton microscopy (MPM)

Multiphoton microscopy is widely recognized as the best available technology for high-resolution intravital visualization of cell motility. A diagram of intravital multiphoton microscopy (MPM) is presented (Figure 2), demonstrating a minimally invasive method for studying biological processes in a living organism at the cellular level in real time. The key element of the MPM is photophysical excitation using femtosecond laser pulses. Depending on the tasks, different excitation modes can be used - two-photon, each of which has its own characteristics and ensures a comprehensive study of cellular behavior and functions in the natural environment. A detailed description of the methodology is given in the work of Rakhymzhan et al. [10].

We are developing and implementing new optical tools and evaluation algorithms to improve the quality of imaging and quantitative assessment of cell functions in multiphoton microscopy of live organisms. Key aspects of the development include (i) a multiphoton system for mesenteric and coronary arteries, (ii) spatially and temporally synchronized dual near-infrared (NIR) and infrared (IR) excitation for spectrally expanded intravital microscopy.

Multiphoton microscopy is widely recognized as the best available technology for high-resolution intravital visualization of cellular motility at the cellular level. In this research, we develop novel approaches to applying optical tools and evaluation algorithms to enhance imaging quality and quantitative assessment of cellular functions in live-organism multiphoton microscopy.

In this paper we try to develop methods of studying the alterations of cellular mechanisms in blood vessels using myography, which will help understand the fundamentals of the pathophysiological process at a deeper level and, in the long term, contribute to the development of new approaches to the treatment and prevention of vascular diseases. The method will be helpful in the study of the modification of the contractile activity of the mesenteric artery and other arteries. The application of advanced technologies, such as two-photon microscopy, will allow us to open the complexity of the spatiotemporal dynamic interactions between various cell types, including endothelial cells, vascular smooth muscle cells, that are involved in maintaining the vascular balance.

Thus, this study aims to develop of *in vivo* methodology for measuring the state or structure of smooth muscle and endothelial cell layers in mesenteric vessels at the cellular level. This will allow the assessment of morphological changes in blood vessels *in vivo* or *in vitro* using native microscopy, visualizing changes in a complex manner, and obtaining data in the pharmacological studies of the functional responses of the mesenteric arteries in the future. In the next step, we compare the advantages and disadvantages of two methods – assessing contractile activity by myograph and visualization using two-photon microscopy.

Materials and methods

Materials and Animals Used in the Study

We used Cdh5:tdTomato x H2B: GFP (Cdh5:tdTom) transgenic mice (age 8-12 weeks) obtained from Free University of Berlin (FUB), Germany, in which endothelial cells express tdTomato in the cytoplasm and membranes (under the *Cdh5* promoter) and H2B-GFP in the nuclei [13]. This allows simultaneous visualization of endothelial cell morphology and nuclear dynamics *in vivo*.

The study will involve 10 male mice aged 8 to 12 weeks, weighing between 25.0 and 30.0 g (average: 33.5 g). All animals will be kept under controlled temperature (21.2°C) and humidity (55.5%) conditions with a 14-hour light cycle and a 10-hour dark cycle. They will be fed commercial food and will have free access to water. There will be no restrictions on water and light throughout the experiment. All animals will receive humane care in accordance with the Principles of Laboratory Animal Care of the National Society for Medical Research and the Guide for the Care and Use of Laboratory Animals, prepared by the Laboratory Animal Resources Institute, published by the National Institutes of Health.

At the end of the experiment, mice will be sacrificed using intraperitoneal injection of ketamine hydrochloride (Ketalar) and xylazine hydrochloride (Alfasin) at doses of 80-100 mg/kg 1 and 10-12.5 mg/kg 1 respectively.

Preparation of mouse models for intravital microscopy

1. Preparing mice for intravital microscopy. Note: Steps a) and b) should be performed at the beginning of the experiment. a. Weigh the Cdh5:td Tom mouse (age 8-12 weeks). b. Prepare 800 µl of anesthetic (ketamine 60 mg/kg, xylazine 4.5 mg/kg, acepromazone 1.75 mg/kg in PBS). c. Anesthetize the mouse. Inject intravenously with 200 µl / 20 g mouse. Monitor anesthesia by finger pinching and respiratory rate.

2. Place the mouse on a heating pad and protect the eyes with eye gel.

3. Place a glass coverslip (35 mm diameter) in a 10-cm tissue culture dish having a 30-mm diameter opening. Use oil to keep the dish in contact with the coverslip.

4. Using scissors, incise the abdominal skin to expose the peritoneum. Cut the peritoneum with scissors to expose the intestine.

5. Add 200 µl of PBS (preheated at 37 °C) to the peritoneal cavity. Hold the mouse in your hand and turn it face down so that the intestine emerges from the peritoneal cavity with gentle pressure. Place the mouse in a tissue culture cup. 9. Using sterilized cotton swabs, gently remove the intestine onto a coverslip to expose the mesenteric vessels.

6. Cut the paper tissues into strips and moisten them with PBS heated to 37°C. Immobilize the intestine with pieces of paper towels to reduce the movements produced by peristalsis.

7. Place the tissue culture dish and mouse in a 37°C thermostated chamber on a custom-made inverted microscope stand. Inject an anesthetic syringe intravenously into the hind paw. NOTE: The mouse can also receive oxygen (0.5 L/min) using a mask.

8. Monitor the mouse's anesthesia by pinching its finger and checking its respiratory rate every 30 min. If necessary, inject an additional portion of anesthetic (20 µl) to maintain anesthesia. NOTE: Drying of the vasculature should be avoided. Therefore, its humidity is maintained by regularly wetting the paper tissues used for intestinal immobilization with PBS heated to 37°C with PBS [2-6, 10, 12, 14, 15].

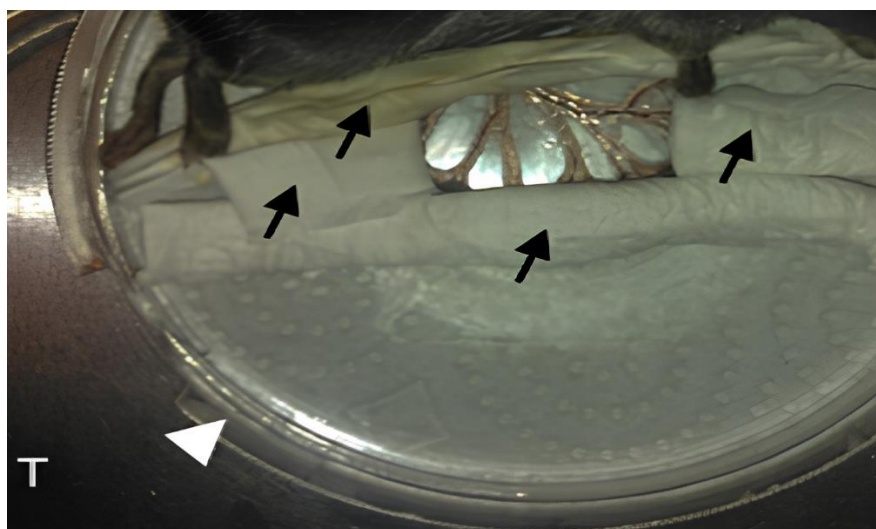


Figure 3. Mouse preparation. The picture from the paper published in 2015 by Emre and colleagues [16]. Black arrows indicate PBS-wetted tissue used to immobilize the intestine. The white arrowhead indicates the 10cm tissue culture dish. T indicates the aluminum custom-made tray stage that fits into the microscope. Mesenteric blood vessels are nicely exposed at the center of the coverslip

Development of a methodology for the application of modern intravital microscopy in pharmacology

Installation of a multiphoton laser-scanning microscope will be undertaken. Experiments involving two-photon fluorescence imaging will be conducted using a specialized laser scanning microscope based on a commercial scanning head (TriMScope II, LaVisionBioTec, Bielefeld, Germany). For excitation, we will use a near-infrared laser (Ti:Sa, Chameleon Ultra II, Coherent, Dieburg, Germany) and an infrared laser (Optical Parametric Amplification Throlabs Inc, USA). The Ti:Sa and OPA laser beams, both linearly polarized, are combined in the scanning base using a dichroic mirror (T1045, Chroma, USA). A water-immersion objective lens (25x, NA 1.0, Plan-Apochromat, Olympus Japan) is used to focus both laser beams on the sample. Laser power is regulated using combinations of $\lambda/2$ wave plates and polarizers. Ultrashort pulses from both lasers are compressed with external optical compressors: a two-prism compressor for Ti:Sa and a custom-built single-prism compressor for OPO. Fluorescence signals, SHG, SFG, and wavelength-mixed signals are collected in a backward direction using a dichroic mirror (775, Chroma, USA) and directed to six photomultipliers (H7422, Hamamatsu, Japan).

All PMT photomultipliers are arranged in a detection system with multiple optical channels, where each channel is defined by a specific fluorescent filter and dichroic mirror set: 466 ± 20 nm, 525 ± 25 nm, 562 ± 20 nm, 593 ± 20 nm, 617 ± 35 nm, 655 ± 20 nm, and 710 ± 20 nm. To prevent photodamage, the average maximum laser power used in all imaging experiments is set at 10 mW. Images with a field of view of $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ and a digital resolution of 1024×1024 pixels are captured with an acquisition time of 944 ms. We acquire z-stacks with a depth of $40 \mu\text{m}$ (z-step of $2 \mu\text{m}$) every 20 seconds for a total imaging time, typically around 30 minutes [3–5,7].

Isometric measurement of tension in mesenteric and coronary arteries

In this technique, blood vessels are carefully dissected, cleaned, and mounted onto a four-channel myograph system under isometric conditions. Each vessel undergoes a normalization process to determine its maximum active tension development, ensuring standardized initial experimental conditions. This standardization is critical for accurately comparing pharmacological responses between different vessels.

Preparation of mesenteric and coronary arteries for isometric measurement of their tensions

The superior mesenteric arteries (SMA) or coronary arteries were isolated and cleared under a cold-light supported microscope in Krebs-Buffer (KB). The third branch of SMA was dissected and mounted in a micro-vessel system. The temperature of KS in the bath was maintained at 37 °C during all experiments. The vessels were incubated for 40 minutes to allow the tissues to recover from the stress of isolation, and the vessel's pressure was adjusted to 100 mmHg tension in four consecutive steps spaced apart by two minutes [2, 5, 6, 8-13].

Vascular contraction levels are expressed in milligrams (mg) as a function of cumulative agonist concentrations, ranging from 0.01 nM to 1 mM. Each dose-response experiment for a contractile agonist lasted approximately 20 minutes. Baseline vascular tension varied between samples and was determined through vessel normalization. Following each dose-response experiment, the tissue baths were thoroughly washed multiple times until the blood vessels returned to their basal state [2, 5, 6, 8-13].

Statistical methods for analyzing in vitro experiments

Maximum contractile responses and EC₅₀ (pD₂) value obtained from concentration-induced PE and 5HT response curves can be analyzed using one-way ANOVA (Tukey's multiple comparison test). cumulative dose response and differences in response to different doses obtained from concentration-induced PE and 5HT response curves can be analyzed using Two-Way ANOVA [16–20].

Data analysis. Image segmentation and tracking of all cells were performed using segmentation, object-recognition, and tracking plugins in Imaris (Bitplane AG, Zurich, Switzerland). 3D Reconstruction and Quantitative Analysis of Mesenteric and Coronary Arteries Using Imaris. Three-dimensional reconstruction of mesenteric and coronary arteries was performed using Imaris software. Vessels were processed using the IsoSurface tool to generate 3D visualizations, with parameters adjusted to optimize surface rendering (threshold set to 5.000, smoothing enabled, and border closure applied). The resulting scenes were saved for further analysis [21].

In Slice view, 2D cross-sections (e.g., slice 35) were used to guide segmentation. Perimeter measurements of arterial walls were conducted using the “Point-to-Point Distance Measurement” tool by drawing polygons along vessel borders, with cumulative distances recorded for analysis.

Morphometric and statistical characterization of vascular structures and endothelial cells was achieved through object-based color coding (e.g., size, roundness), 3D volume rendering, and temporal tracking via the “Track” component. Endothelial cells, nuclei, and vesicles were visualized using specific color channels (green, blue, red, respectively). Quantitative parameters were extracted under the “Statistics” tab, and exported to Excel for further evaluation [1–6, 8, 13-14, 21]. Cell tracks that were present in the field of view for more than 10 recorded time points (i.e., 5 min) were included in the analysis. Statistical analysis of the data was performed using Prism (Graph Pad Software Inc., San Diego, USA) [7, 22].

Results and discussion

Emre and colleagues first described a novel method for *in vivo* investigation of mesenteric arteries in 2015, marking a significant advancement in the field of vascular research [15, 23–24]. The introduction of genetically modified CDH5 Cadherin (Chd5:tdTom) mice further expanded the potential of this approach by enabling precise visualization of specific cell populations within the vascular environment. Building upon these developments, our study proposes the integration of this advanced imaging technique into conventional vascular research protocols [20]. Rather than replacing established isometric functional assays, we advocate for a complementary approach that combines the strengths of both methodologies – leveraging the cellular resolution of intravital microscopy while preserving the proven utility of traditional isometric measurements [16, 25–26].

In vitro experimental paradigms allow for extended observation durations, typically ranging from 10 to 16 hours, thereby enabling the utilization of a single vascular segment across multiple experimental conditions. Given that certain vasoactive agonists induce transient effects lasting approximately 5 to 15 minutes, experimental protocols extending up to one hour are often optimal for characterizing both acute and sustained responses [18–22, 27]. This temporal flexibility underscores the suitability of the isometric technique for such pharmacological investigations. The highly controlled conditions inherent to *in vitro* systems support precise and reproducible monitoring of vascular responses [21, 22, 27]. Additionally, the implementation of multi-chamber organ bath systems (e.g., four or eight simultaneous baths) increases experimental throughput and facilitates the detection of subtle variations in vascular reactivity. A further advantage of the isometric method lies in its capacity to establish and monitor baseline vascular tone, enabling the assessment of how shifts in basal tone modulate the vessel's dose-dependent contractile behavior [23–28, 15].

Our study demonstrates that combining *in vitro* isometric measurements with advanced *in vivo* imaging techniques, such as two-photon microscopy, offers a comprehensive approach to the functional and structural assessment of vascular tissues. The isometric method allows for prolonged experimental durations, high-throughput data acquisition, and the generation of objective, quantifiable parameters of vascular contractility. Its compatibility with pharmacological modulation using receptor-specific agonists and antagonists further enables mechanistic insights into vascular reactivity and tone regulation. Moreover, the ability to measure basal tone and analyze dose–response relationships enhances its value in vascular physiology studies [9–11, 15–22, 27].

Figure 4 shows myograms of the coronary (A) and mesenteric (B) arteries at rest and with the use of vasoconstrictors. The figure illustrates the dose-response relationship of vascular contraction in the presence of various antagonists in the mesenteric and coronary arteries, assessed using isometric tension measurements with the Myograph DMT 630. Data acquisition was performed using the Biopac MP30 system.

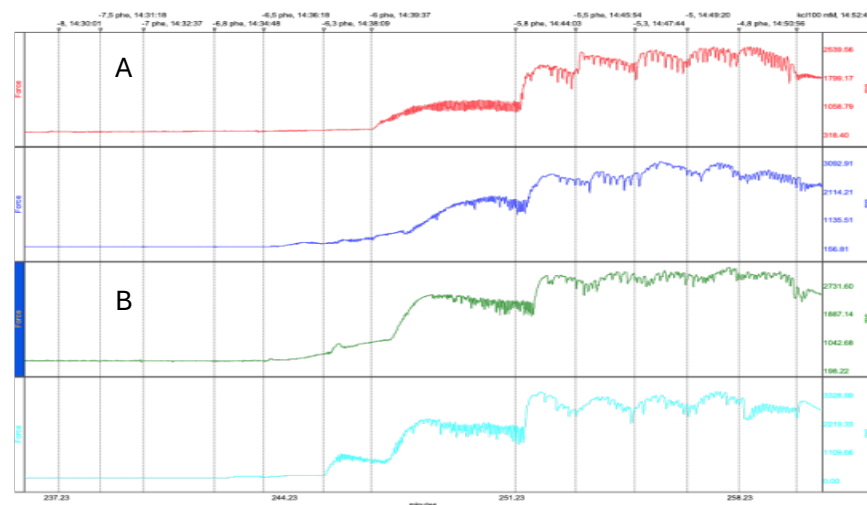


Figure 4. Coronary and mesenteric arteries myograms (**A** – coronary arteries, **B** – mesenteric arteries)

Figure 5 illustrates differences in vascular contraction between blood vessels with and without an intact endothelium, quantified in milligrams of contraction force. Notably, vessels lacking endothelium exhibit a reduced contractile response, measuring approximately 1000 mg less than intact vessels [2, 5-6, 8, 13].

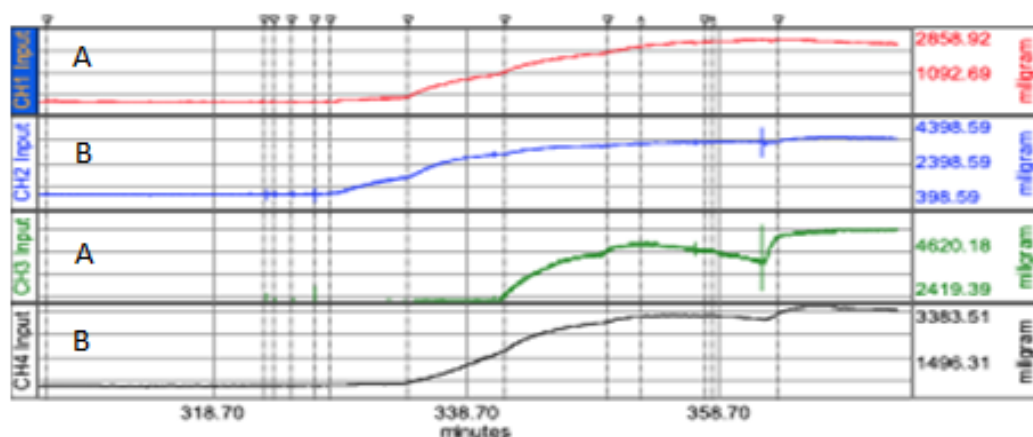


Figure 5. Vascular contraction between blood vessels with and without an intact endothelium (**A** – coronary arteries, **B** – mesenteric arteries)

Figure 6 demonstrates that this method enables the continuous assessment of vascular contraction and relaxation functions over an extended period, with recordings maintained uninterrupted for 5-6 hours. Additionally, it allows simultaneous monitoring of the responses of four blood vessels to different agonists or antagonists, facilitating the detection of subtle variations in their reactivity [16-19].

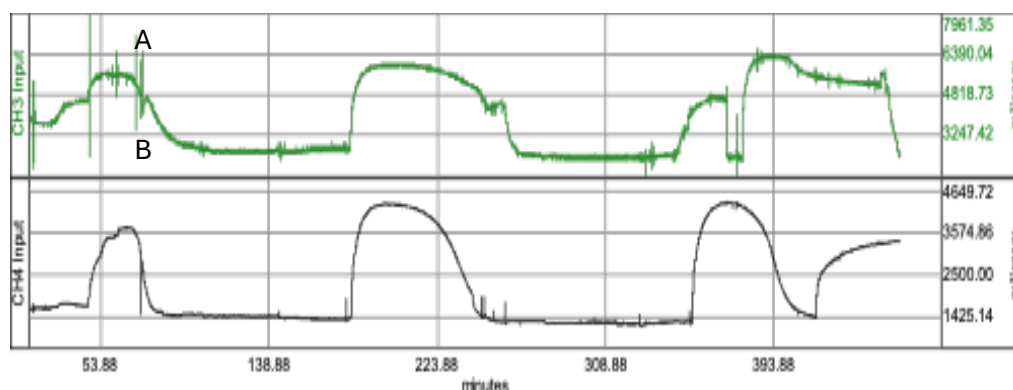


Figure 6. Continuous assessment of vascular contraction and relaxation functions
(A – coronary arteries, B – mesenteric arteries)

Thus, the use of isometric measurements, in particular the application of the myography method, is a tool for the objective study of vascular function, pathways and mechanisms of its control, which is the study of isolated vessels. Myography of isolated vessels makes it possible to standardise the influence of physical factors (transmural pressure, shear stress on the endothelium, composition of the environment, temperature), electrical stimulation with currents of specified parameters, standardisation of the concentration of metabolic agents, and, as a result, multiple control of the activation and functioning of vasomotor mechanisms. Thus, working with a myograph allows for the analysis of both the contractile function itself and the mechanisms underlying it [11]. Isometric methods allow assessing the functional state of the body's vessels *in vivo*, while the MFM method makes it possible to visualize their deep structure. Both methods are notable in that they allow conducting *in vivo* studies in real time. Figures 7 and 8 show images of the vessel obtained using the MFM method.

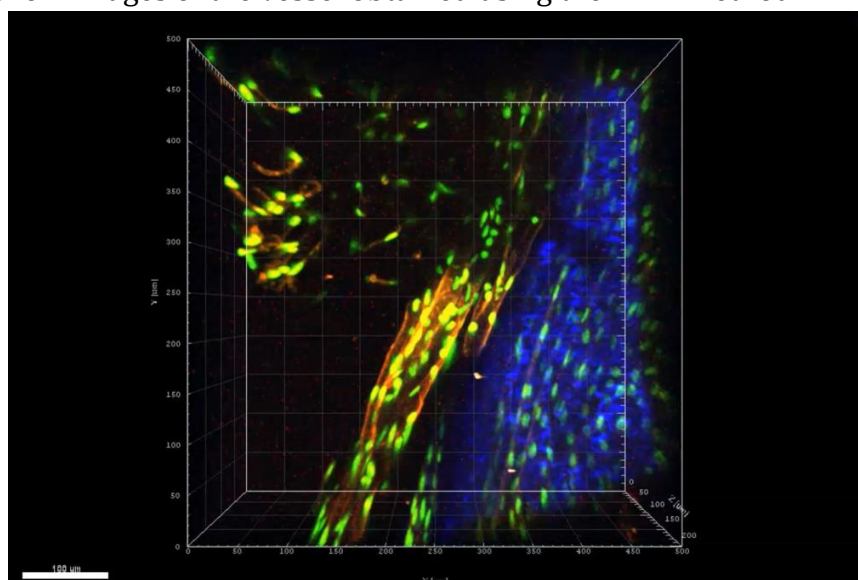


Figure 7. Three-dimensional (3D) visualization of the coronary artery in a transgenic mouse using two-photon microscopy. Imaging was performed with two-photon excitation at 930 nm. Endothelial

cell nuclei expressing GFP signal are shown in green membrane, and cytoplasm expressing tdTomato is shown in red, delineating the vessel walls. Collagen fibers are visualized in blue signal via a second harmonic generation. The figure provides a detailed anatomical localization and distribution of coronary arteries, including their abundance within the depth of cardiac tissue. Scale bar: 80 μm .

Additionally, this imaging approach enables the quantification of endothelial cell abundance within coronary arteries. The ability to monitor dynamic changes in vessel diameter within a five-minute timeframe facilitates the assessment of vascular reactivity. Notably, the extent of diameter modulation varies depending on pathophysiological conditions such as hypertension or atherosclerosis.

Furthermore, this method offers a unique perspective for examining coronary arteries, allowing for precise measurements of endothelial cell thickness and providing valuable insights into vascular remodeling under different physiological and pathological conditions.

Furthermore, this imaging approach enables visualization of the spatial arrangement and depth-dependent distribution of connective and adipose tissues, allowing for quantitative evaluation of tissue density. The structural composition of connective tissue is known to undergo alterations in response to pathophysiological conditions such as hypertension and atherosclerosis, primarily due to changes in collagen-to-fat ratios. This methodology provides an advanced perspective for assessing connective tissue remodeling and enables precise measurement of tissue thickness, offering valuable insights into disease-associated structural modifications [5-6, 8, 13, 29-31].

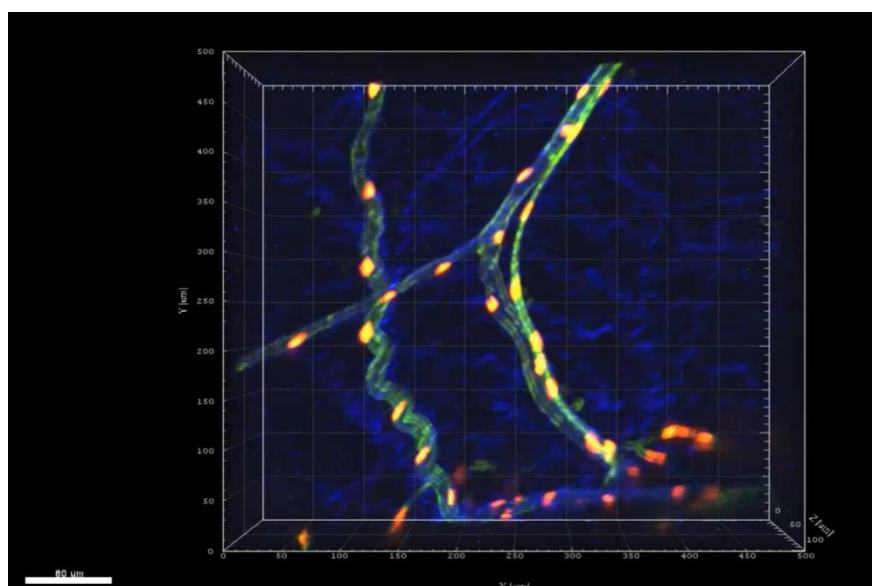


Figure 8. Three-dimensional reconstruction of the mesenteric artery in mice using two-photon microscopy. Imaging was performed at 930 nm excitation. Endothelial cell nuclei expressing GFP appear in green, while membranes and cytoplasm expressing tdTomato are shown in red, outlining vessel walls. Collagen fibers are visualized in blue via second harmonic generation (SHG). This image enables detailed anatomical localization of mesenteric arteries and supports comparative analysis of vascular architecture relative to the coronary circulation. Scale bar: 80 μm

Additionally, this imaging technique enables the assessment of mesenteric artery density at varying depths, as well as the quantification of endothelial cell abundance. The ability to track dynamic changes in vessel diameter within a five-minute time frame allows for the evaluation of vascular reactivity. Notably, the extent of diameter modulation varies depending on pathophysiological conditions such as hypertension or atherosclerosis.

Furthermore, this method provides a unique perspective for examining mesenteric arteries, facilitating precise measurements of endothelial cell thickness and offering insights into vascular remodeling under different physiological and pathological states. According to these results, we suggest using two-photon microscopy in vivo.

Conclusion

Complementing this, two-photon microscopy facilitates high-resolution, real-time, three-dimensional imaging of cellular and subcellular vascular structures in living tissue. The dynamic visualization of specific components, such as smooth muscle cells or myofibrils, is made possible through the use of fluorescent markers, enabling long-term monitoring of physiological changes under near-native conditions.

Together, these methodologies significantly expand the experimental capacity for studying vascular function, reduce animal use through multiparametric analysis, and provide a powerful platform for both short- and long-term investigations of vascular behavior in health and disease.

Author Contributions

T.A. – concept and supervision of the work, conducting the experiments, discussion of the research results, discussion of the research results; **A.R.** – concept and supervision of the work, conducting the experiments, discussion of the research results, discussion of the research results; **S.G.** – concept and supervision of the work, conducting the experiments, discussion of the research results, discussion of the research results; **A.A.** – discussion of the research results; **Z.D.** – editing the text of the article; **A.S.** – editing the text of the article.

Acknowledgments

We express our sincere gratitude to the Free University of Berlin (FUB) and the German Rheumatism Research Center for their invaluable support in the implementation of this research. The study was made possible through the use of their advanced material and technical infrastructure, including access to a multiphoton laser scanning microscope. Two-photon fluorescence imaging was conducted using a specialized laser scanning system based on the TriMScope II commercial scanning microscope, which significantly contributed to the high-resolution imaging and data quality achieved in this work.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Compliance with ethical standards

The research has approval from the Local Ethical Commission of the Al-Farabi Kazakh National University NJSC (LEC Protocol No. IRB A906, dated October 16, 2024) (IRB00010790 al-Farabi Kazakh National University IRB#1).

References.

1. Gleissner CA. Translational atherosclerosis research: From experimental models to coronary artery disease in humans. *Atherosclerosis*. 2016;248. doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2016.03.013
2. Leben R, Lindquist RL, Hauser AE, Niesner R, Rakhymzhan A. Two-Photon Excitation Spectra of Various Fluorescent Proteins within a Broad Excitation Range. *Int J Mol Sci*. 2022;23(21). doi.org/10.3390/ijms232113407
3. Nitschke C, Garin A, Kosco-Vilbois M, Gunzer M. 3D and 4D imaging of immune cells in vitro and in vivo. *Histochemistry and Cell Biology*. 2008;130. doi.org/10.1007/s00418-008-0520-x
4. Mertens TF, Liebheit AT, Ehl J, et al. MarShie: a clearing protocol for 3D analysis of single cells throughout the bone marrow at subcellular resolution. *Nat Commun*. 2024;15(1). doi.org/10.1038/s41467-024-45827-6
5. Rakhymzhan A, Acs A, Hauser AE, Winkler TH, Niesner RA. Improvement of the similarity spectral unmixing approach for multiplexed two-photon imaging by linear dimension reduction of the mixing matrix. *Int J Mol Sci*. 2021;22(11). doi.org/10.3390/ijms22116046
6. Schuh CD, Haenni D, Craigie E, et al. Long wavelength multiphoton excitation is advantageous for intravital kidney imaging. *Kidney Int*. 2016;89(3). doi.org/10.1038/ki.2015.323
7. Mulvany MJ, Halpern W. Contractile properties of small arterial resistance vessels in spontaneously hypertensive and normotensive rats. *Circ Res*. 1977;41(1). doi.org/10.1161/01.res.41.1.19.
8. Ulbricht C, Leben R, Rakhymzhan A, et al. Intravital quantification of absolute cytoplasmic B cell calcium reveals dynamic signaling across B cell differentiation stages. *bioRxiv*. 2019. doi.org/10.1101/2019.12.13.872820
9. Mulvany MJ, Aalkjær C. Structure and function of small arteries. *Physiol Rev*. 1990;70(4). doi.org/10.1152/physrev.1990.70.4.921.
10. Ulbricht C, Leben R, Rakhymzhan A, et al. Intravital quantification reveals dynamic calcium concentration changes across B cell differentiation stages. *Elife*. 2021;10. doi.org/10.7554/eLife.56020
11. Spiers A, Padmanabhan N. A guide to wire myography. *Methods Mol Med*. 2005;108:91-104. doi.org/10.1385/1-59259-850-1:091.
12. Rakhymzhan A, Radbruch H, Niesner RA. Quantitative Imaging of Ca²⁺ by 3D-FLIM in Live Tissues. In: Dmitriev, R. (eds) *Multi-Parametric Live Cell Microscopy of 3D Tissue Models*. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, Springer, Cham. 2017;1035. p.135-141. doi.org/10.1007/978-3-319-67358-5_9
13. Sørensen I, Adams RH, Gossler A. DLL1-mediated Notch activation regulates endothelial identity in mouse fetal arteries. *Blood*. 2009;113(22). doi.org/10.1182/blood-2008-08-174508
14. Rakhymzhan A, Acs A, Leben R, Winkler TH, Hauser AE, Niesner RA. (2021). Method for Multiplexed Dynamic Intravital Multiphoton Imaging. In: Zamir, E. (eds) *Multiplexed Imaging*. *Methods in Molecular Biology, Humana*. New York, NY. 2021;2350. p.145-156. doi.org/10.1007/978-1-0716-1593-5_10
15. Angus JA, Wright CE. Techniques to study the pharmacodynamics of isolated large and small blood vessels. *J Pharmacol Toxicol Methods*. 2000;44(2). doi.org/10.1016/s1056-8719(00)00121-0
16. Emre Y, Jemelin S, Imhof BA. Imaging neutrophils and monocytes in mesenteric veins by intravital microscopy on anesthetized mice in real time. *Journal of Visualized Experiments*. 2015;2015(105). doi.org/10.3791/53314
17. Watts SW, Morrison SF, Davis RP, Barman SM. Serotonin and blood pressure regulation. *Pharmacological Reviews*. 2012;64. doi.org/10.1124/pr.111.004697

18. Ozis SE, Akhayeva T, Guner S, Kilicoglu SS, Pampal A. Etanercept restores vasocontractile sensitivity affected by mesenteric ischemia reperfusion. *Journal of Surgical Research*. 2018;226. doi.org/10.1016/j.jss.2018.01.005
19. Guner S, Akhayeva T, Nichols CD, Gurdal H. The Ca²⁺/CaM, Src kinase and/or PI3K-dependent EGFR transactivation via 5-HT_{2A} and 5-HT_{1B} receptor subtypes mediates 5-HT-induced vasoconstriction. *Biochem Pharmacol*. 2022;206. doi.org/10.1016/j.bcp.2022.115317.
20. Akhayeva T, Ozansoy G. ER- α Receptors Have More Prominent Depressor Role On Vasocontractile Sensitivity in Treated And Untreated-Ovariectomized Rat Mesentery Artery. *The FASEB Journal*. 2015;29(S1). doi.org/10.1096/fasebj.29.1_supplement.627.5
21. Akhayeva T, Ari N, Ozansoy G. The acute relaxant effects of estrogen receptor agonists in diabetic-ovariectomized rat aorta. *Turk J Pharm Sci*. 2011;8(2). doi.org/10.12459
22. Jeong HW, Hernández-Rodríguez B, Kim JM, et al. Transcriptional regulation of endothelial cell behavior during sprouting angiogenesis. *Nat Commun*. 2017;8(1). doi.org/10.1038/s41467-017-00738-7.
23. Orshal JM, Khalil RA. Gender, sex hormones, and vascular tone. Vol. 286, *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*. 2004. doi.org/10.1152/ajpregu.00338.2003.
24. Leben R, Ostendorf L, Van Koppen S, et al. Phasor-based endogenous NAD(P)H fluorescence lifetime imaging unravels specific enzymatic activity of neutrophil granulocytes preceding NETosis. *Int J Mol Sci*. 2018;19(4). doi.org/10.3390/ijms19041108
25. Barton M, Prossnitz ER. Emerging roles of GPER in diabetes and atherosclerosis. *Trends in Endocrinology and Metabolism*. 2015;26. doi.org/10.1016/j.tem.2015.02.003.
26. Meyer MR, Fredette NC, Howard TA, et al. G protein-coupled estrogen receptor protects from atherosclerosis. *Sci Rep*. 2014;4. doi.org/10.1038/srep07564.
27. Reismann D, Stefanowski J, Günther R, et al. Longitudinal intravital imaging of the femoral bone marrow reveals plasticity within marrow vasculature. *Nat Commun*. 2017;8(1). doi.org/10.1038/s41467-017-01538-9.
28. Mazzuca MQ, Li W, Reslan OM, Yu P, Mata KM, Khalil RA. Downregulation of microvascular endothelial type B endothelin receptor is a central vascular mechanism in hypertensive pregnancy. *Hypertension*. 2014;64(3). doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03315.
29. Prossnitz ER, Barton M. The G-protein-coupled estrogen receptor GPER in health and disease. *Nature Reviews Endocrinology*. 2011;7. doi.org/10.1038/nrendo.2011.122.
30. Wissmeyer G, Kassab MB, Kawamura Y, Aguirre AD, Jaffer FA. Intravital Microscopy in Atherosclerosis Research. In: Ramji, D. (eds) *Atherosclerosis. Methods in Molecular Biology*. Humana, New York, NY. 2022;2419 p. 645–658 doi.org/10.1007/978-1-0716-1924-7_40.
31. Praxenthaler J, Kirchner C, Schwier E, et al. Case report: Early detection of mesenteric ischemia by intravital microscopy in a patient with septic shock. *Front Med (Lausanne)*. 2022;9. doi.org/10.3389/fmed.2022.985977.

Мезентериалды және коронарлық артерияны зерттеуде көпфотонды интравитальді микроскопияны қолдануын енгізу

А.А. Рахымжан¹, А.Н. Аралбаева¹, Ш. Гунер², З.Д. Душимова¹,
Т.А. Ахаева^{1*}, А.М. Сейталиева¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Юксек Ихтисас университеті, Анкара, Түркия

Аңдатпа. Интравитальді бейнелеу технологияларындағы жетістіктер, әсіресе мультифотонды микроскопия, нақты уақыт режимінде тамырлы құрылымдар мен әртүрлі жасуша түрлерінің динамикалық өзара әрекеттесуін визуализациялау және түсіну қабілетімізді айтарлықтай жақсартты. Дегенмен, дәстүрлі *in vitro* әдістері (мысалы, изометриялық миография) тамырлардың реактивтілігін бағалаудың стандартты құралдары болып қала береді. Бұл зерттеу жасушалық деңгейде мезентериальды тамырлардағы тегіс бұлшықеттер мен эндотелий қабаттарының функционалдық және құрылымдық күйлерін бағалау үшін *in vivo* және *in vitro* әдістемелерін әзірлеуге және біріктіруге бағытталған. Жергілікті микроскопиялық әдістерді пайдалана отырып, біз морфологиялық өзгерістерді бағалаймыз және оларды мезентериальды және коронарлық артериялардағы фармакологиялық жауаптарымен корреляциялаймыз. Негізгі мақсат – қан тамырларының жиырылуы мен релаксация реакцияларын талдауда изометриялық миография мен жетілдірілген мультифотонды микроскопияның мүмкіндіктері мен шектеулерін салыстыру. Бұл әдістерді біріктіріп пайдалану деректер сапасын арттырады, жануарларды пайдалануды азайтады және ұзақ зерттеулерде қолданылады деп күтілуде. Бұл интегративті тәсіл сонымен қатар физиологиялық жағдайға жақын жағдайларда фармакологиялық агенттердің жедел және созылмалы әсерін бағалауға мүмкіндік береді, бұл тамырлар функциясын жан-жақты түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: изометриялық өлшемдер, мезентериальды артерия, интравитальді мультифотонды микроскопия, эндотелий жасушалары

Внедрение мультифотонной интравитальной микроскопии для исследования брыжеечной и коронарной артерии

А.А. Рахымжан¹, А.Н. Аралбаева¹, Ш. Гунер², З.Д. Душимова¹,
Т.А. Ахаева^{1*}, А.М. Сейталиева¹

¹КазНУ имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Университет Юксек Ихтисас, Анкара, Түрция

Аннотация. Достижения в области технологий прижизненной визуализации, в частности, многофотонной микроскопии, значительно улучшили нашу способность визуализировать и понимать динамические взаимодействия внутри сосудистых структур и различных типов клеток в режиме реального времени. Однако традиционные методы *in vitro*, такие, как изометрическая миография, остаются стандартными инструментами для оценки сосудистой реактивности. Целью данного исследования является разработка и интеграция методик *in vivo* и *in vitro* для оценки функционального и структурного состояния гладкомышечных и эндотелиальных слоев брыжеечных сосудов на клеточном уровне. Используя методы собственной микроскопии, мы оцениваем морфологические изменения и сопоставляем их с фармакологическими реакциями

как в брыжеечных, так и в коронарных артериях. Основная цель — сравнить возможности и ограничения изометрической миографии и усовершенствованной многофотонной микроскопии при анализе сократимости и релаксационных реакций сосудов. Ожидается, что совместное использование этих методов повысит качество данных, сократит использование животных и обеспечит возможность проведения длительных исследований. Этот интегративный подход также позволяет оценивать как острые, так и хронические эффекты фармакологических препаратов в условиях, близких к физиологическим, обеспечивая более полное понимание сосудистой функции.

Ключевые слова: изометрические измерения, брыжеечная артерия, интравитальная мультифотонная микроскопия, эндотелиальные клетки, трансгенная мышь

Сведения об авторах:

Рахымжан Асылхан Ануарбекулы – к.ф.-м.н., и.о. доцента кафедры фундаментальной медицины, факультет медицины и здравоохранения, НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Төле би, 96, 050000, Алматы, Казахстан.

Аралбаева Арайлым Нугмановна – к.б.н., асс.профессор, и.о.профессора кафедры фундаментальной медицины, факультет медицины и здравоохранения, НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Төле би, 96, 050000, Алматы, Республика Казахстан.

Гунер Шайка – Ph.D., ассистент профессора, кафедра медицинской фармакологии, медицинский факультет, Университет Юксек Ихтисас, 06100, Анкара, Турция.

Душимова Зауре Дмитриевна – к.м.н., заместитель директора Высшей школы медицины по научно-инновационной деятельности, и.о. доцента кафедры фундаментальной медицины факультета медицины и здравоохранения, НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Төле би, 96, 050000, Алматы, Республика Казахстан.

Ахеева Тамила Абдикаликовна – Ph.D., доцент кафедры фундаментальной медицины, факультет медицины и здравоохранения, НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Төле би, 96, 050000, Алматы, Республика Казахстан.

Сейталиева Аида Мурзекеновна – к.м.н., заведующая кафедрой фундаментальной медицинской факультета медицины и здравоохранения, НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Төле би 96, 050000, Алматы, Республика Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Рахымжан Асылхан Әнуарбекұлы – ф.-м.ғ.к., іргелі медицина кафедрасының доцент м.а., медицина және денсаулық сақтау факультеті, әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Төле би 96, 050000, Алматы, Қазақстан.

Аралбаева Арайлым Нугмановна – б.ғ.к., қауымдастырылған профессор, іргелі медицина кафедрасының профессор м.а., медицина және денсаулық сақтау факультеті, әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Төле би 96, 050000, Алматы, Қазақстан.

Гунер Шайка – Ph.D., профессор ассистент, медициналық фармакология кафедрасы, медицина факультеті, Юксек Ихтисас Университеті, 06100, Анкара, Турция.

Душимова Зауре Дмитриевна – м.ғ.к., Жоғары медицина мектебі директорының ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі орынбасарының м.а., іргелі медицина кафедрасының доценті, медицина және денсаулық сақтау факультеті, әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Төле би 96, 050000, Алматы қаласы, Қазақстан.

Ахеева Тамила Абдикаликовна – PhD., іргелі медицина кафедрасының доценті, медицина және денсаулық сақтау факультеті, әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Төле би 96, 050000, Алматы, Қазақстан.

Сейталиева Аида Мурзекеновна – м.ғ.к., іргелі медицина кафедрасының меңгерушісі, медицина және денсаулық сақтау факультеті, әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Төле би 96, 050000, Алматы, Қазақстан.

Information about the authors:

Rakhymzhan Asylkhan – Ph.D., acting Associate Professor, Department of Fundamental Medicine, Faculty of Medicine and Health Care, Al-Farabi Kazakh National University, Tole bi 96, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Aralbaeva Araylim – Candidate of Biological Sciences, Ass. Professor, Department of Fundamental Medicine, Faculty of Medicine and Health Care, Al-Farabi Kazakh National University, Tole bi 96, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Guner Sahika – Ph.D., Asst. Prof. Dr. Department of Medical Pharmacology, Faculty of Medicine, Yuksek Ihtisas University, 06100 Ankara, Turkey.

Dushimova Zaure – M.D., Deputy director on research and international collaboration, Higher School of Medicine, PhD., Associate Professor, Department of Fundamental Medicine, Faculty of Medicine and Health Care, Al-Farabi Kazakh National University, Tole bi 96, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Akhayeva Tamila – Ph.D., Associate Professor, Department of Fundamental Medicine, Faculty of Medicine and Health Care, Al-Farabi Kazakh National University, Tole bi 96, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Seitaliyeva Aida – PhD, Head of the Department of Fundamental Medicine, Faculty of Medicine and Health Care, Al-Farabi Kazakh National University, Tole bi 96, 050000, Almaty, Kazakhstan.



МРНТИ 34.39.23

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-56-75>

Возрастные психофизиологические особенности ассоциативного научения с подкреплением

Д. Абдильманов¹, Г.К. Датхабаева¹, М. Жолдасова¹, А.М. Кустубаева*¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Ассоциативное научение – познавательная функция, обеспечивающая адаптивное поведение и безопасную жизнедеятельность. Оно включает совокупность когнитивных процессов, вовлекающих нейросети заинтересованных зон мозга, отвечающих за обработку информации, исполнительный контроль, сенсомоторную координацию, субъективное переживание поощрения и наказания, и зависит от их интеграции между собой и сигналами обратной связи. Выявление психофизиологических закономерностей нормального развития когнитивной функции важно для понимания ее механизмов, установления возрастных норм и ранней идентификации отклонений в развитии. Цель исследования - изучение возрастной динамики поведенческих показателей научения с подкреплением у детей с применением детерминистской поведенческой модели научения. Выявлено, что скорость сенсомоторной реакции (СР) на зрительные стимулы значимо выше у старших детей, и временная динамика СР с возрастом меняется: на ранних этапах научения СР растет в обеих возрастных группах, а на поздних падает у младших детей и выходит на «плато» у старших. Показано сходство паттерна флуктуаций СР на ранних и поздних этапах научения: рост СР на поздних этапах научения относительно ранних в обеих возрастных группах. Наблюдающиеся возрастные закономерности могут свидетельствовать об особенностях развития механизмов научения. Полученные результаты могут быть полезными для разработки современных подходов диагностики нарушения развития детей, своевременной коррекции в обучении и при планировании учебной нагрузки в школе.

Ключевые слова: ассоциативное научение, подкрепление, развитие когнитивных функций, возрастная динамика, психофизиологические характеристики

Введение

Способность к научению является важнейшей когнитивной функцией мозга и лежит в основе адаптивного поведения, обеспечивающего эффективную и безопасную жизнедеятельность. Благодаря способности к научению происходит развитие познавательных

Поступила: 07.03.2025. Одобрена: 30.09.2025. Доступна онлайн: 30.09.2025.

функций, приобретение индивидуального опыта, знаний, умений и навыков, от которых зависят все аспекты жизни человека [1]. Индивидуальный опыт приобретается за счет научения с первых попыток путем проб и ошибок, когда от адекватности реакции на внешние вызовы зависит жизненно важное для человека приспособление к окружающей среде. Индивид, наблюдая результаты своих действий в различных условиях, получая положительную (в случае удачных попыток) или отрицательную (при допущении ошибки) обратную связь, то есть положительное или отрицательное подкрепление своих реакций в ответ на возникшую ситуацию, устанавливает ассоциацию между своим действием и его последствиями, что справедливо для всех этапов онтогенеза. Научение, возникающее на основе установления ассоциации между действием в ответ на определенную ситуацию и его результатом (положительной или отрицательной обратной связью/положительным или отрицательным подкреплением), получило название ассоциативного научения с подкреплением или научения на основе обратной связи [2].

Научение с подкреплением представляет собой сложный когнитивный процесс, включающий внимание, восприятие, память, мышление, принятие решения, сенсомоторные акты и зависящий от их успешной интеграции как между собой, так и с сигналами обратной связи [3, 4]. Соответственно, при научении с подкреплением происходит вовлечение дефинитивных распределенных нейронных сетей [5], входящих в заинтересованные зоны мозга, отвечающие за обработку сенсорных, семантических, пространственных характеристик стимулов, процессы рабочей памяти, управляющие функции, сенсомоторную координацию, двигательный контроль, субъективное переживание поощрения и наказания [3].

Для изучения мозговых механизмов научения с подкреплением широко используются поведенческие модели, представляющие собой компьютерные задачи на ассоциативное научение с подкреплением. В зависимости от целей исследования применяются два основных подхода – детерминистский и вероятностный. Детерминистская парадигма дает преимущество при исследовании механизмов научения, происходящего с первых попыток, играющего важную роль в жизни индивида. В ней устанавливаются фиксированные правила обратной связи. В частности, обратная связь дается как за все правильные ответы (положительный отзыв), так и за все неправильные реакции (отрицательный отзыв). При этом с момента успешного усвоения правила нажатия на заданные клавиши клавиатуры компьютера (или кнопки пульта) в ответ на появление стимула, которое должно произойти с первых попыток путем проб и ошибок, информационная роль положительного подкрепления падает, так как его появление становится однозначно предсказуемым [6].

Применение детерминистской парадигмы позволяет производить отдельный анализ психофизиологических коррелятов на раннем этапе научения (на стадии разгадывания правила), когда положительная и негативная обратная связь являются значимым сигналом, и на поздней стадии выполнения задачи в соответствии с успешно усвоенным правилом, когда сигнал обратной связи теряет повышенную значимость. Таким образом, простые модели детерминистских задач наиболее релевантны для изучения дискретных изменений в активности мозга при научении [6] и их возрастных особенностей в динамике индивидуального развития мозга.

При помощи методов нейровизуализации [3, 7] и регистрации эклектических сигналов мозга в процессе выполнения зрительно предъявляемых задач на научение

с подкреплением [8] достигнуто понимание определенных механизмов мозгового обеспечения научения в норме и при определенных нарушениях [3, 9, 10]. В частности, показано, что в научение динамически вовлечены дофаминэргическая мезолимбическая система вознаграждения, включающая проекции дофаминергических нейронов среднего мозга вентральной области покрышки (VTA) в полосатое тело, префронтальную кору, миндалевидное тело, гиппокамп и другие структуры лимбической системы [11], билатерально зрительная, орбитофронтальная и вентромедиальная префронтальная кора, медиальная теменная кора, верхняя и нижняя теменная доля, медиальная лобная кора (дополнительная моторная область), средняя лобная извилина, таламус, средний островок, левая прецентральная извилина (премоторная область) и средняя височная извилина [2, 6, 12]. При этом предполагается, что в научении с подкреплением стриатуму принадлежит роль интегратора зрительно-моторной информации с сигналами о ценности подкрепления в ходе выполнения задачи [2, 13].

ЭЭГ-исследования нейрофизиологических коррелятов научения с применением методов анализа потенциалов, связанных с событиями (ERP) и локализации источников активности, установили динамические паттерны мозговой активности при научении с подкреплением и роль функциональных систем мозга, вовлеченных в осуществление этой жизненно важной когнитивной функции у детей и взрослых в норме и при определенных нарушениях [10, 14]. Однако полное понимание мозговых механизмов научения с подкреплением, как и всех других когнитивных функций, далеко не достигнуто, так же, как и не до конца раскрыты закономерности развития и созревания нейросетей, являющихся мозговым субстратом научения [15, 16].

Изучение возрастных особенностей научения имеет как теоретико-методологическое, так и практическое значение. Выявление психофизиологических закономерностей формирования когнитивной функции в процессе нормального индивидуального развития вносит существенный вклад в идентификацию ее мозговых механизмов в зрелом возрасте, а также дает возможность устанавливать возрастные нормы и выявлять отклонения в развитии на ранних этапах, что важно для своевременной коррекции и предотвращения трудностей в обучении [1, 17].

Целью нашего исследования было изучение возрастной динамики изменений поведенческих показателей ассоциативного научения на основе положительной и отрицательной обратной связи с применением хорошо зарекомендовавшей себя детерминистской поведенческой модели [3, 6]. Проводилась регистрация электрической активности головного мозга ЭЭГ в процессе выполнения поведенческой задачи на научение с подкреплением для последующего анализа вызванных потенциалов мозга (ERP). В настоящей статье приводятся результаты поведенческих данных исследования.

Методика исследования

Участники исследования

К участию в исследовании допускались дети-добровольцы, подписавшие собственноручно (при возрасте от 18 лет и старше) информированное согласие, либо чьи родители/опекуны давали письменное информированное согласие, отвечавшие критериям включения: отсутствие в анамнезе хронических неврологических и психиатрических заболеваний, травм головы, нормальное или скорректированное

до нормального зрения. Возраст детей составил от 11 до 20 лет (средний возраст – $15,5 \pm 3,2$). Всего в исследовании приняло участие 90 детей (47 мальчиков и 43 девочки), школьники средних общеобразовательных школ города Алматы, студенты вузов и колледжей. Участники были разделены на 2 возрастные группы: 11-15 лет (23 мальчика и 24 девочки, средний возраст – $12,8 \pm 1,6$) и 16-20 лет (24 мальчика и 19 девочек, средний возраст $18,4 \pm 1,4$). При этом доли девочек и мальчиков в каждой возрастной группе статистически не различались ($p=0,33$ по критерию хи-квадрат), то есть группы по половому составу были сбалансированными.

Поведенческая задача на научение с положительной и отрицательной обратной связью

Компьютерная задача на ассоциативное научение запрограммирована в среде E-prime 2.0 и синхронизирована с ЭЭГ через компьютерный интерфейс, что позволяет проводить анализ вызванных потенциалов мозга на определенные категории экспериментальных событий. Задача представляет собой модификацию теста, разработанного Eliassen с соавторами [6], и адаптирована для применения на казахоязычной и русскоязычной популяции.

От испытуемого требовалось за первые три попытки разгадать правила нажатия на клавиши компьютерной клавиатуры в ответ на появление картинки то на правой, то на левой стороне экрана в случайном порядке. Тестирование начиналось с появления в центре экрана инструкции. Далее появлялась точка фиксации взгляда в виде крестика. Затем предъявлялась картинка слева или справа от точки фиксации взгляда, следом – пустой экран, во время которого ребенок должен был дать ответ (нажать клавишу «1», соответствующую направлению «лево», или «2», означавшую «право»). После поступала обратная связь. Время экспозиции точки фиксации взгляда, стимулов и сигналов обратной связи – 2000 мс. Длительность пустого экрана варьировалась от 500 до 2250 мс. На рисунке 1 изображена временная схема поведенческой задачи на ассоциативное научение с подкреплением.

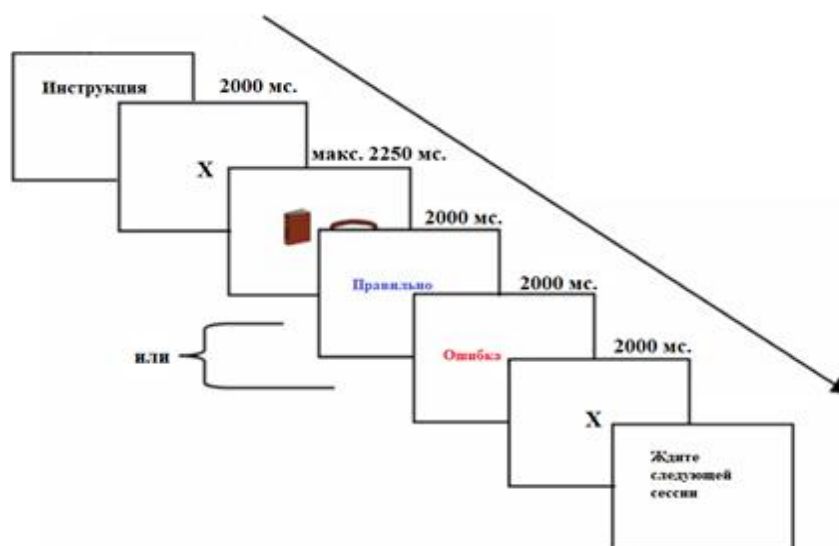


Рисунок 1. Временная схема поведенческой задачи на ассоциативное научение с подкреплением

Каждый выбор клавиши подкреплялся обратной связью в виде слов «ПРАВИЛЬНО!» (положительное подкрепление, если испытуемый нажимал на нужную клавишу), «ОШИБКА!» (отрицательное подкрепление в случае ошибки) и знака вопроса «?» при отсутствии ответа со стороны испытуемого. Всего действовало 4 правила: 1) при появлении картинки с любой стороны нажимать «право»; 2) при появлении картинки с любой стороны нажимать «лево»; 3) нажимать противоположную картинке сторону; 4) нажимать сторону, на которой появляется картинка.

Процедура эксперимента

Задача на ассоциативное научение состояла из 4 последовательных блоков/сессий (А, В, С, D) по 5 минут каждая. Блок включал сет из 8 картинок, правила нажатия на клавишу при появлении картинки сменялись в рандомном порядке. Об изменении правила испытуемый мог догадаться по сообщению об ошибке. Положительное подкрепление, получаемое несколько раз подряд, свидетельствовало об успешно выявленном правиле. Каждый блок в целом включал 49 предъявлений из 8 чередовавшихся в случайном порядке наборов картинок.

Каждая проба состояла из 5-7 предъявлений и считалась успешно выполненной только в том случае, если обследуемый разгадывал правило за первые три попытки, когда получал положительную обратную связь, начиная с 4 предъявления (или ранее) непрерывно до конца пробы. По логике теста для разгадывания правила путем проб и ошибок достаточно первых двух-трех попыток. Если научения к 4 предъявлению не происходило (был хотя бы один неправильный ответ, начиная с 4 предъявления), такие пробы исключались из усреднения по этапам выполнения теста.

До начала эксперимента проводился инструктаж, и испытуемые выполняли пробную сессию для уяснения задания. Инструктаж и задание предъявлялись на казахском или русском языке в зависимости от родного языка ребенка. Предварительный сравнительный анализ выполнения задач на казахском и русском языках не выявил достоверных различий. Статистический анализ не выявил достоверных различий психофизиологических показателей научения между мальчиками и девочками. В связи с этим разделения по языку и полу не проводилось.

Статистический анализ

В качестве психофизиологического показателя научения выступило время реакции (BP) на предъявление стимула, то есть временной промежуток между появлением картинки на экране и нажатием на клавишу «1» или «2».

Первичные результаты BP были получены с помощью E-Data Aid (<https://support.pstnet.com/hc/en-us/articles/115000902608-E-DATAID-Opening-a-Data-File-22794>). Для статистического анализа показателей возрастных особенностей психофизиологических параметров научения использовалась программа IBM SPSS Statistics v21. Применялись методы описательной статистики, включая таблицы сопряженности кросс-таб с критерием статистической достоверности различий хи-квадрат, однофакторный дисперсионный анализ (One Way ANOVA), дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями repeated measures (межгрупповой фактор – возрастная группа, внутригрупповые факторы – порядковый номер попытки, ранний и поздний этапы

выполнения задачи, порядковый номер серии), парный критерий Стьюдента с учетом множественности измерений.

Под ранним и поздним этапами научения подразумевались соответственно первые три попытки и последующие 4 попытки. Этапы усреднялись только по тем пробам, в которых испытуемый успешно справился с задачей, то есть последующие 4-7 попыток были с положительным подкреплением.

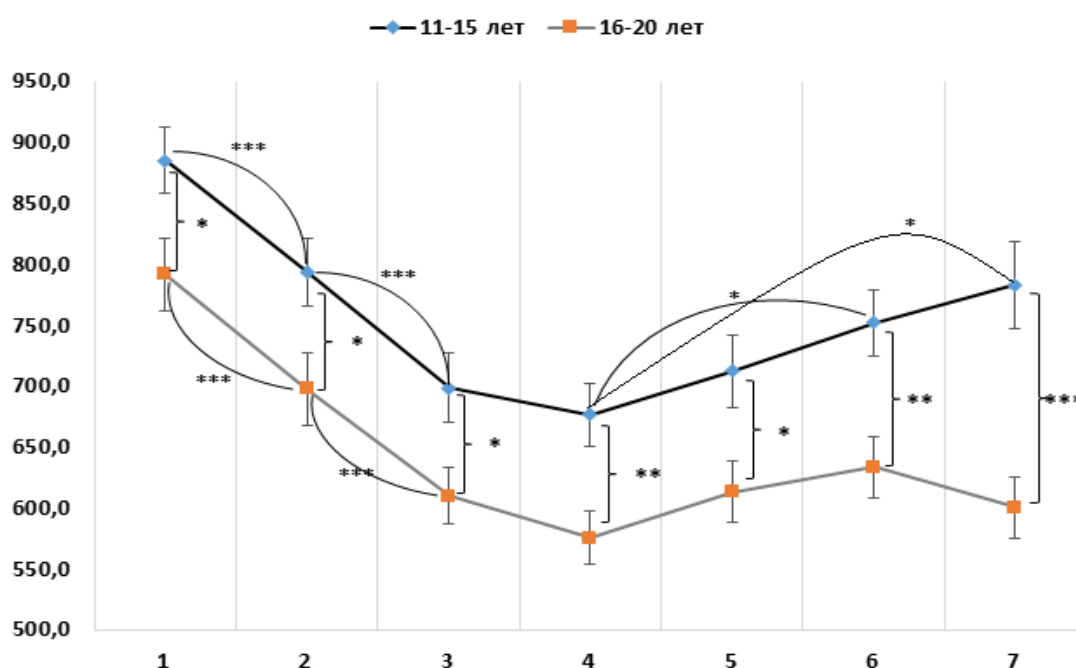
Для прослеживания возрастных особенностей динамики научения усреднялось ВР каждой попытки по 4 сессиям. Для сравнительного анализа ВР раннего этапа (этап научения) и позднего этапов (этап успешного научения) усреднение проводилось по всем 4 сессиям (A-D). Для прослеживания возрастных особенностей динамики научения от первой сессии к четвертой проводилось усреднение по этапам выполнения задачи внутри каждой сессии (усреднение ранних попыток сессии А, усреднение поздних попыток сессии А и так в каждой сессии до сессии D). Кроме того, для сопоставления возрастных особенностей научения усреднялось ВР всех ошибочных ответов (после таких ответов следовала отрицательная обратная связь) и ВР всех правильных ответов за все 4 сессии.

Результаты исследования

Временная динамика изменений времени реакции

На рисунке 2 представлен график временной динамики изменений ВР от первой попытки к последней, усредненных по всем четырем сессиям в младшей и старшей группах детей. Звездочками отмечены статистически значимые межгрупповые и внутригрупповые различия. Межгрупповой сравнительный анализ ВР выявил, что старшие дети статистически значимо отличаются от младших сниженным ВР на всем протяжении решения задачи на научение с подкреплением (Рисунок 2).

Анализ ANOVA с повторными измерениями, где внутригрупповым фактором выступал порядковый номер стимула задачи на научение – «шаг», а межгрупповым – «возраст», показал достоверные эффекты «возраста» ($F=11,193$ $p=0.001$), «шага» ($F=68.06$, $p=0.00$), а также наличие взаимодействия факторов «шаг» x «возраст» ($F=6.039$, $p=0.016$). Результаты свидетельствуют о том, что время реакции у старшей группы обследуемых ниже по сравнению с младшей при научении на всем протяжении выполнения задачи, а также о различии временной динамики изменений ВР между младшими и старшими детьми. В частности, от первой попытки ко второй и к третьей происходило значимое сокращение ВР в обеих возрастных группах детей (Рисунок 2), однако после 3 попытки начиналось расхождение в траектории изменения скорости реакции в процессе выполнения задачи на научение (Рисунок 2). В младшей группе детей начиналось значимое градуальное снижение скорости реакции (рост ВР), особенно выраженное к самому концу испытания (Рисунок 2), когда скорость реакции упала до уровня в третьей попытке. В то же время в старшей группе детей начиная с 4 попытки скорость реакции выходила на «плато» и удерживалась на одном уровне до конца испытания (Рисунок 2).



Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – порядковые номера стимулов (1-7). * $p < 0.05$, ** $p < 0.005$, *** $p < 0.0005$

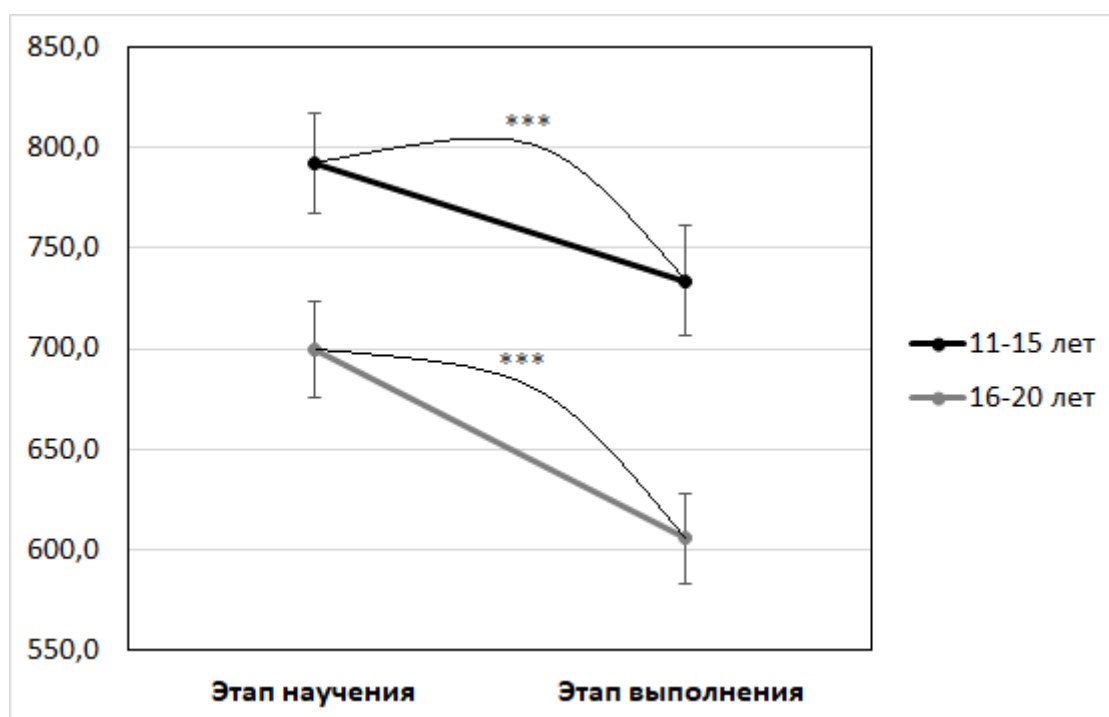
Рисунок 2. Временная динамика изменений времени реакции на предъявление стимулов задачи по научению от первой попытки к последней у младшей и старшей групп детей

Время реакции на раннем и позднем этапах научения

На рисунке 3 показана динамика ВР от раннего этапа научения (разгадывание правила путем проб и ошибок) к позднему (испытуемый успешно усвоил правило и выполнял задачу по заданному правилу), усредненного по всем четырем сессиям А-Д, выявленная при помощи дисперсионного анализа ANOVA с повторными измерениями (внутригрупповой фактор – «этап», межгрупповой – «возраст»).

ANOVA с повторными измерениями (Рисунок 3) выявил достоверный эффект внутригруппового фактора «этап» ($F=80.808$, $p=0.000$), в частности, значимое уменьшение ВР на позднем этапе научения, когда дети успешно усвоили правило и выполняли по нему задачу, по сравнению с начальным этапом научения, когда дети путем проб и ошибок разгадывали правило. Также выявлен достоверный эффект межгруппового фактора «возраст» ($F=10.794$, $p=0.001$), подтверждающий меньшее значение ВР у старших детей по сравнению с младшими на всех этапах научения. Однако взаимодействие факторов «этап» и «возраст» не достигло уровня достоверности ($F=3.337$, $p=0.060$), что указывает на схожесть динамики изменений времени реакции от начального этапа к позднему в обеих возрастных группах (Рисунок 3), а именно значимый рост скорости реакции при усвоении правила как у младших, так у старших детей.

One Way ANOVA выявил, что ВР у старших детей меньше по сравнению с младшими как на раннем ($F=7.309$, $p=0.008$), так и на позднем ($F=12.998$, $p=0.001$) этапах научения (Рисунок 3).

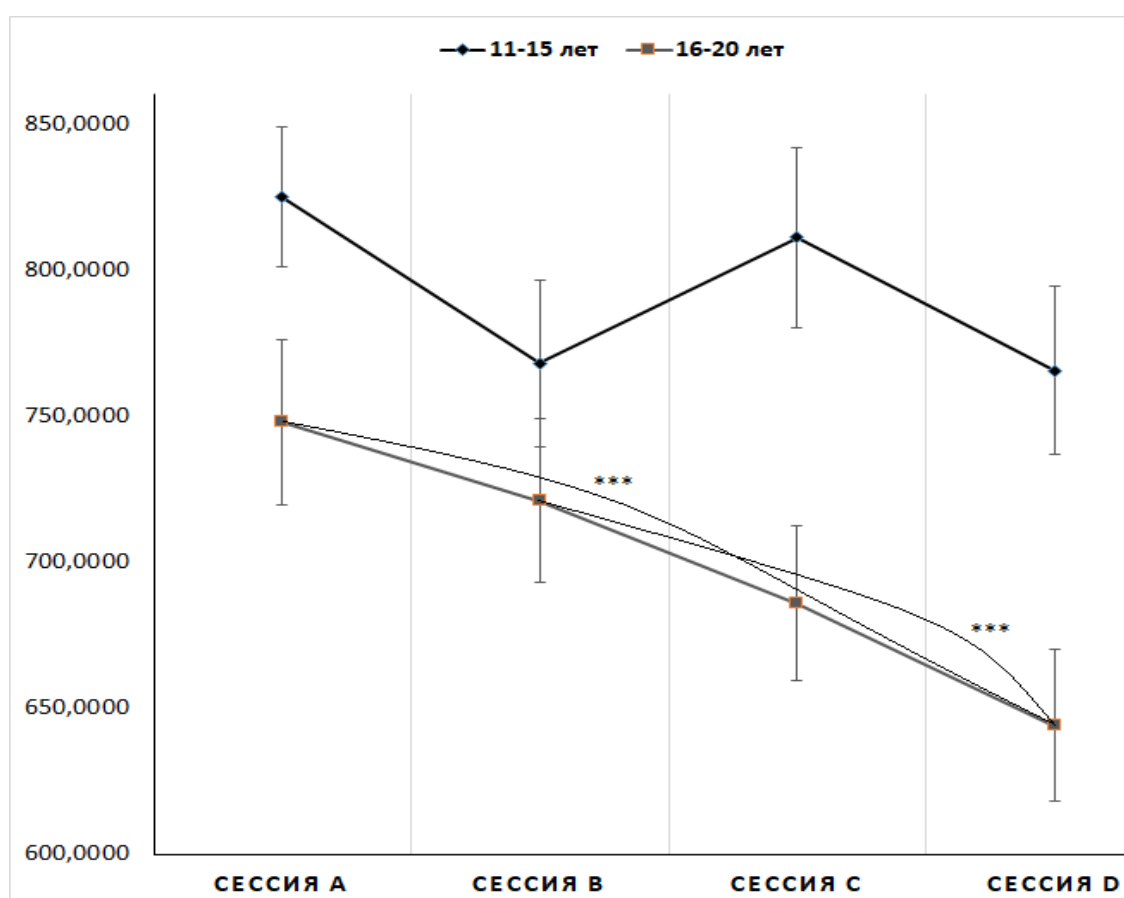


Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – этапы научения. *** $p < 0.0005$

Рисунок 3. Время реакции на предъявление стимулов на раннем и позднем этапах научения у младшей и старшей групп детей

Скорость реакции в зависимости от индивидуального опыта

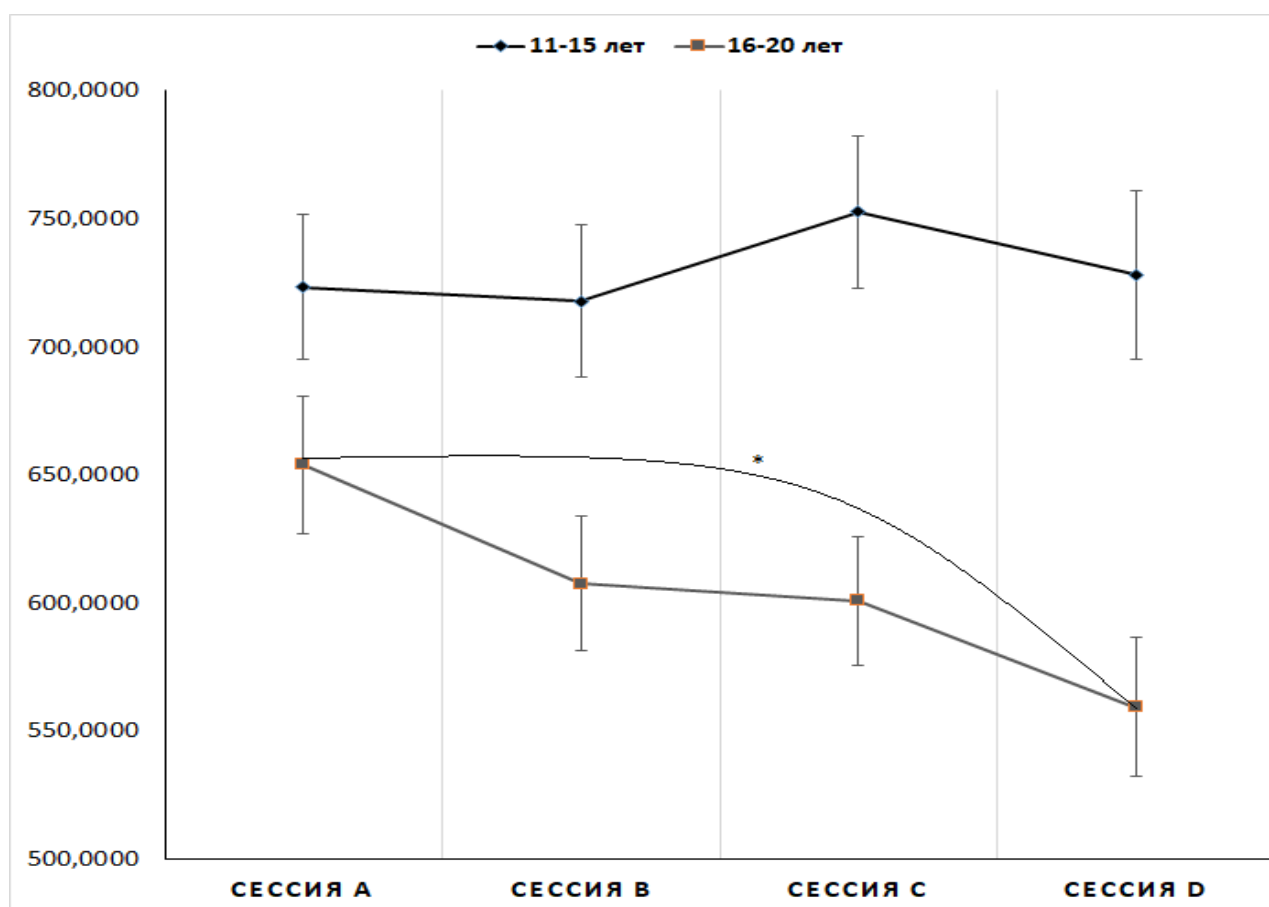
Для оценки влияния индивидуального опыта решения задач на процесс научения у детей разного возраста был проведен дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями в последовательности четырех сессий выполнения задачи (от А до D, фактор «сессия») в каждой возрастной группе отдельно для раннего этапа научения и позднего. На рисунке 4 представлена динамика изменений ВР от сессии к сессии на раннем этапе научения в двух группах детей. Эффект «сессии» не выявил достоверности ($F=3.664$, $p=0.062$) в младшей группе, в то время как в старшей группе он показал значимость ($F=8.189$, $p=0.007$). Если в младшей группе детей ВР от сессии к сессии незначимо колебалось в разные стороны, то в старшей группе неуклонно и значимо уменьшалось. Парное сравнение ВР в четырех сессиях по парному критерию Стьюдента для зависимых выборок с поправкой на множественные измерения показало, что в старшей группе детей ВР на стимулы во время первой и второй сессий было значимо ниже, чем в последней четвертой (Рисунок 4).



Примечания: по оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – сессии испытания.
*** $p < 0.0005$

Рисунок 4. Динамика изменений ВР в последовательности четырех сессий на раннем этапе научения у младшей и старшей групп детей

Динамика изменений ВР от сессии к сессии на позднем этапе научения (Рисунок 5) оказалась сходной с ранним этапом в обеих группах детей. В частности, ANOVA с повторными измерениями не выявил ($F=0.891$, $p=0.448$) достоверности эффекта фактора «этапа» в младшей группе и обнаружил его в старшей группе ($F=5.979$, $p=0.001$). Попарное сравнение ВР в четырех сессиях с поправкой на множественные измерения показало, что в старшей группе детей ВР на стимулы во время первой сессии было значимо ниже, чем в последней (Рисунок 5).

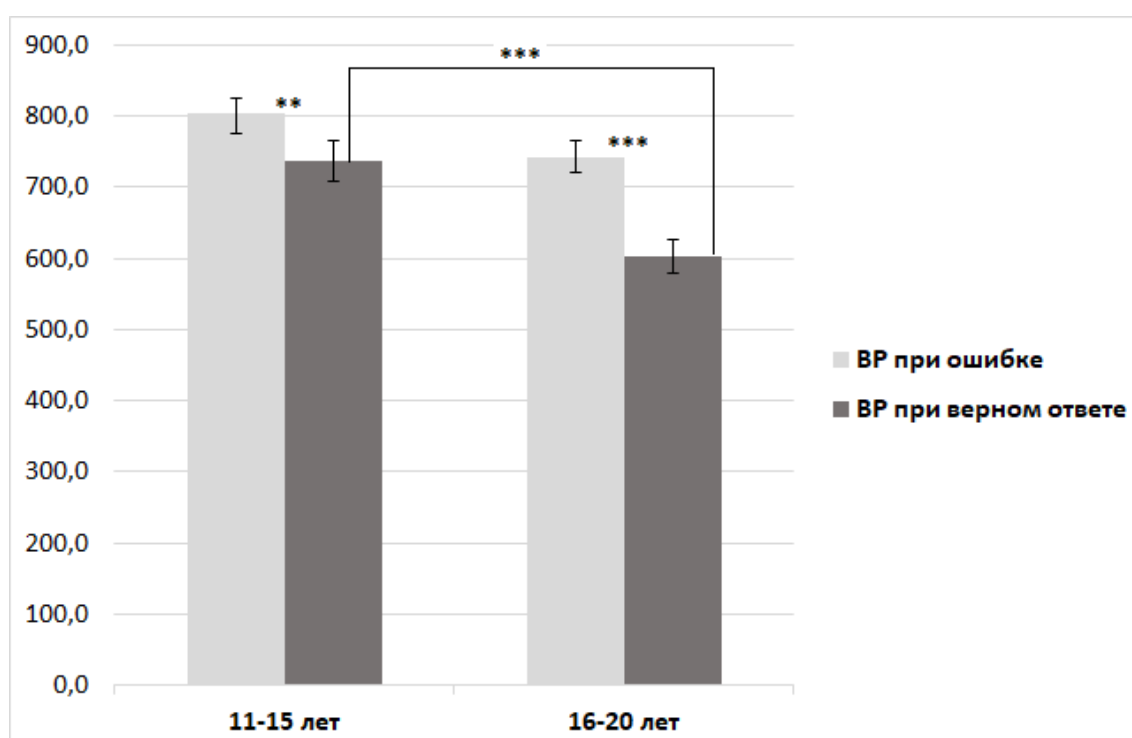


Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – сессии испытания. * $p < 0.05$

Рисунок 5. Динамика изменений ВР в последовательности четырех сессий на позднем этапе научения у младшей и старшей групп детей

Скорость реакции при отрицательной и положительной обратной связи

Дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями, где внутригрупповой фактор «корректность» и межгрупповой фактор «возраст» показал (Рисунок 6) статистически значимый эффект фактора «корректность» ($F=61.849$, $p=0.000$). ВР при правильном ответе достоверно меньше ВР, чем при ошибке в обеих возрастных группах (Рисунок 6). Фактор «возраст» ($F=10.148$, $p=0.002$) и взаимодействие факторов «возраст» х «корректность» ($F=8.934$, $p=0.004$) были статистически достоверными. При этом сравнение ВР при ошибке и верном ответе между группами One Way ANOVA (Рисунок 6) указало на наличие статистически значимых различий между старшей и младшей группами по скорости реакции только при правильных ответах ($F=14.826$, $p=0.000$), в отличие от неправильных ($F=3.265$, $p=0.072$). В старшей группе ВР снижалось в среднем на 20,8%, тогда как в младшей лишь на 2,5%.



Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – возрастные группы детей.
** $p < 0.005$, *** $p < 0.0005$

Рисунок 6. Время реакции при ошибочных и верных ответах в младшей и старшей группах детей

Обсуждение результатов

Согласно результатам исследования, дети 16-20 лет по сравнению с детьми 11-15 лет имеют более высокую скорость сенсомоторной реакции на зрительные стимулы на всем протяжении ассоциативного научения, что может отражать большую зрелость центральных мозговых механизмов, вовлечённых в научение у старших детей. Так, по данным литературы, миелинизация мозговых волокон в основном завершается к 5 годам [18], однако миелинизация в ретикулярной формации, имеющей важное значение в процессах внимания [19], а также внутрикорковых волокон в ассоциативных зонах коры мозга продолжается до 20 лет [20-22].

Анализ временной динамики изменений скорости реакции от первой попытки к последней выявил особенности, связанные с возрастом, заключающиеся в том, что сначала от первой попытки к третьей наблюдалась сходная динамика изменений ВР (неуклонное сокращение ВР) в обеих возрастных группах детей, но после 3 попытки в младшей группе детей скорость реакции начала значительно падать, а в старшей выходила на «плато» и удерживалась на одном уровне до конца 20-минутного испытания (Рисунок 2). Установленные различия могут быть связаны с последовательным морфо-функциональным созреванием неспецифической системы активации мозга

[23], центральным звеном которой является ретикулярная формация мозга [24], что приводит к уменьшению ресурсов к концу 20-минутного испытания у младших детей, в отличие от старших. Применение детерминистской парадигмы в модели ассоциативного научения с подкреплением на взрослой популяции [6] позволило обнаружить различия как на поведенческом уровне (в скорости реакции), так и в паттернах активации нейросетей во время раннего и позднего этапов научения. Если ранние этапы научения сопровождались замедленной скоростью реакции, мобилизацией специализированных соматосенсорных и других заинтересованных зон мозга, включая мотивационные центры вознаграждения и области, ответственные за управляющие функции (стриатум и префронтальная кора), то поздние этапы научения отличались резким сокращением ВР и редукцией активации в префронтальной коре и стрии [6].

Как отмечалось выше, ранний этап научения связан с активным разгадыванием правила методом проб и ошибок, где обратная связь служит инструктирующим сигналом для последующих принятий решений, тогда как на позднем этапе научения испытуемые успешно выполняют задачу по усвоенному правилу, и информационная роль положительного подкрепления становится однозначно предсказуемым. В нашем исследовании мы выявили сходный паттерн флуктуаций ВР в обеих группах испытуемых, что может отражать достаточную сформированность систем вознаграждения в детском возрасте и согласуется с данными литературы о повышенной роли этих систем в ассоциативном научении с подкреплением у детей и в целом о высокой чувствительности мотивационных центров вознаграждения у детей [25].

Результаты нашего исследования свидетельствуют, что старшие дети уже могут успешно использовать индивидуальный опыт решения задач, совершенствуя индивидуальные подходы к ее решению, в отличие от младших детей: у старших детей от сессии к сессии скорость реакции значительно росла как на ранних, так и на поздних этапах научения, в то время как у младших детей не менялась (Рисунки 4-5). Наблюдение может быть обусловлено более генерализованным характером вовлечения нейросетей мозга в выполнение задачи на научение у младших детей и активацией более локальных специализированных нейросетей у старших детей. Такая закономерность психофизиологического развития когнитивных функций от генерализованной активации мозговых систем до локально-специфической активации нейросетей описана в литературе для ряда когнитивных функций [26, 27].

Анализ скорости реакции на появление стимулов при ошибочном и правильном выборе клавиши (при отрицательной и положительной обратной связи) выявил как общую закономерность в двух группах детей, так и возрастные психофизиологические особенности научения (Рисунок 6). Общая закономерность заключалась в том, что ВР при правильном ответе достоверно меньше ВР, чем при ошибке в обеих возрастных группах (Рисунок 6). Возрастная особенность выражалась в том, что различия во ВР при правильном и ошибочном ответе достоверно более выражены в старшей группе детей. Также ВР в старшей группе оказалась достоверно меньше, чем в младшей группе только при правильных ответах, в то время как при ошибочных достоверных различий не было. Обнаруженные закономерности могут указывать на механизмы созревания структур мозга, участвующих в процессе научения у старших детей, что соответствует литературным данным о поэтапности и гетерохронности структурного и

функционального созревания мозга в онтогенезе, происходящего за счет качественных перестроек нейросетей, особенно продолжительно наблюдающихся в лобных отделах коры и ретикулярной формации. При недостаточной зрелости данных нейросетей выполнение когнитивных функций осуществляется за счет более генерализованного (менее избирательного) включения нейросетей в функциональные объединения, что на поведенческом уровне проявляется в более медленной скорости сенсомоторной реакции. По мере морфо-функционального созревания мозга обеспечиваются условия для реализации когнитивных функций максимально эффективным, экономичным путем за счет формирования избирательных наиболее адекватных функциональных систем, отвечающих за обработку специфической информации и управление деятельностью [28- 30].

Заключение

Таким образом, при помощи испытанной на взрослой популяции детерминистской модели научения с подкреплением, позволяющей изучать дискретные изменения активности мозга, и, соответственно, психофизиологических параметров на качественно различных этапах ассоциативного научения, выявлены возрастные психофизиологические особенности научения, а также общие закономерности развития. В частности, показано, что скорость сенсомоторной реакции на зрительные стимулы статистически значимо выше у детей 16-20 лет по сравнению с детьми 11-15 лет. Также установлены возрастные различия во временной динамике ВР в ходе выполнения задачи: на ранних этапах научения неуклонное сокращение ВР в обеих возрастных группах детей, однако на поздних – падение скорости реакции в младшей группе и выход на «плато» в старшей. Кроме того, выявлено, что старшие дети, в отличие от младших, успешно использовали свой опыт решения задачи, от сессии к сессии демонстрируя рост скорости реакции. Сходство паттерна флуктуаций ВР на ранних и поздних этапах научения (снижение ВР на поздних этапах научения относительно ранних) в обеих возрастных группах могут свидетельствовать о достаточной сформированности систем вознаграждения в детском возрасте и согласуется с данными литературы о повышенной роли этих систем в научении с подкреплением, и их высокой чувствительности у детей. Выявленные возрастные особенности и общие закономерности, по-видимому, указывают на постепенное морфо-функциональное созревание неспецифической системы активации мозга у младших детей, на более совершенные нейромеханизмы научения у старших детей, и согласуются с литературными данными о поэтапности и гетерохронности структурного и функционального развития мозга за счет качественных перестроек нейросетей, особенно в лобных отделах коры, отвечающих за исполнительный контроль. Выполнение когнитивных функций на ранних этапах развития вовлекает более генерализованную активность нейросетей, в то время как с возрастом наблюдается больше вовлечение избирательных функциональных объединений, обеспечивающую более эргономичную реализацию когнитивных задач. Полученные результаты могут быть полезными для разработки современных подходов диагностики нарушения развития детей, своевременной коррекции в обучении и при планировании учебной нагрузки в школе.

Вклад авторов

Д.А., Г.Д., и М.Ж. – проведение экспериментов; **Д.А. и Г.Д.** – статистический анализ первичных данных; **Д.А., Г.Д. и М.Ж.** – написание текста статьи; **Г.Д., М.Ж. и А.К.** – редактирование текста статьи; **А.К.** – обсуждение результатов исследования; **А.К.** – концепция и руководство работой.

Финансирование

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ № BR27198099).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в финансовой или какой-либо иной сфере.

Соблюдение этических норм

Протокол исследования отвечает стандартам Хельсинской декларации и получил одобрение локального этического комитета КазНУ им. аль-Фараби (Протокол заседания ЛЭК №IRB-A843 от 23.05.2024).

Список литературы

1. Nussenbaum K, Hartley CA. Reinforcement learning across development: What insights can we draw from a decade of research? *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2020; 45:100832. doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100733
2. Gerraty RT, Davidow JY, Foerde K, et al. Dynamic Flexibility in Striatal-Cortical Circuits Supports Reinforcement Learning. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(10):2442-2453. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2084-17.2018
3. Kustubayeva AM, Nelson EB, Smith ML, Allendorfer JB, Eliassen JC. Functional MRI study of feedback-based reinforcement learning in depression. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2022;6:1. doi.org/10.3389/fninf.2022.1028121
4. Marco-Pallarés J, Müller SV, Münte TF. Learning by doing: an fMRI study of feedback-related brain activations. *Neuroreport*. 2007;18(14):1423-6. doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282e9a58c
5. Yael Niv. Reinforcement learning in the brain. *Journal of Mathematical Psychology*. 2009;53(3):139-154. doi.org/10.1016/j.jmp.2008.12.005
6. Eliassen JC, Lamy M, Allendorfer JB, et al. Selective role for striatal and prefrontal regions in processing first trial feedback during single-trial associative learning. *Brain Research*. 2012;1458:56-66. doi.org/10.1016/j.brainres.2012.04.010
7. Rodriguez Buritica JM, Eppinger B, Heekeren HR. et al. Observational reinforcement learning in children and young adults. *npj Science of Learning*. 2024;9(18). doi.org/10.1038/s41539-024-00227-9
8. Lauzon SA, Abraham AE, Curcin K, Butler BE, Stevenson RA. The relationship between multisensory associative learning and multisensory integration. *Neuropsychologia*. 2022; 174:108336. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108336
9. Pechtel P, Pizzagalli DA. Disrupted reinforcement learning and maladaptive behavior in women with a history of childhood sexual abuse: a high-density event-related potential study. *JAMA Psychiatry*. 2013;70(5):499-507. doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2013.728

10. Shephard E, Jackson GM, Groom MJ. Electrophysiological correlates of reinforcement learning in young people with Tourette syndrome with and without co-occurring ADHD symptoms. *International Journal of Developmental Neuroscience*. 2016;51:17-27. doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2016.04.005
11. Lewis RG, Florio E, Punzo D, Borrelli E. The Brain's Reward System in Health and Disease. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2021;1344:57-69. doi.org/10.1007/978-3-030-81147-1_4
12. Brovelli A, Laksiri N, Nazarian B, Meunier M, Boussaoud D. Understanding the neural computations of arbitrary visuomotor learning through fMRI and associative learning theory. *Cerebral Cortex*. 2008;18:1485–1495. doi.org/10.1093/cercor/bhm198
13. Daw ND, O'Doherty JP, Dayan P, Seymour B, Dolan RJ. Cortical substrates for exploratory decisions in humans. *Nature*. 2006;441:876-879. doi.org/10.1038/nature04766
14. Palidis DJ, Gribble PL. EEG correlates of physical effort and reward processing during reinforcement learning. *Journal of Neurophysiology*. 2020;124(2):610-622. doi.org/10.1152/jn.00370.2020
15. Subramanian A, Chitlangia S, Baths V. Reinforcement learning and its connections with neuroscience and psychology. *Neural Networks*. 2022;145:271-287. doi.org/10.1016/j.neunet.2021.10.003
16. Christakou A, Gershman SJ, Niv Y, et al. Neural and Psychological Maturation of Decision-making in Adolescence and Young Adulthood. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2013;25(11):1807–1823. doi.org/10.1162/jocn_a_00447
17. Александров ЮИ. Психофизиологические закономерности научения и методы обучения. *Психологический журнал*. 2012;33(6):5-19.
18. Deoni SCL, Dean DC, Remer J, Dirks H, O'Muircheartaigh J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *NeuroImage*. 2015;115:147-161. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.058
19. Paus T. Functional anatomy of arousal and attention systems in the human brain. *Progress in Brain Research*. 2000;126:65-77. doi.org/10.1016/S0079-6123(00)26007-X
20. Caviness VSJr, Kennedy DN, Richelme C, Rademacher J, Filipek PA. The human brain age 7-11 years: a volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex*. 1996;6(5):726-36. doi.org/10.1093/cercor/6.5.726
21. Kelly C, Ball G, Matthews LG, et al. Investigating brain structural maturation in children and adolescents born very preterm using the brain age framework. *Neuroimage*. 2022;247:118828. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118828
22. Buyanova IS, Arsalidou M. Cerebral White Matter Myelination and Relations to Age, Gender, and Cognition: A Selective Review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021;15:662031. doi.org/10.3389/fnhum.2021.662031
23. Ball G, Kelly CE, Beare R, Seal ML. Individual variation underlying brain age estimates in typical development. *Neuroimage*. 2021;15(235):118036. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118036
24. Мачинская РИ., Крупская ЕВ. Созревание регуляторных структур мозга и организация внимания у детей младшего школьного возраста. *Когнитивные исследования: сб. науч. трудов*. М.: Изд-во Института психологии РАН; 2008;2:32–48.
25. Van Leijenhorst L, Gunther Moor B, Op de Macks ZA., Rombouts SA., Westenberg PM., Crone EA. Adolescent risky decision-making: neurocognitive development of reward and control regions. *Neuroimage*. 2010;51(1):345-55. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.038
26. Snook L, Paulson LA, Roy D, et al. Diffusion tensor imaging of neurodevelopment in children and young adults. *Neuroimage*. 2005;26:1164–1173. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.03.016

27. Безруких ММ, Мачинская РИ, Фарбер ДА. Структурно-функциональная организация развивающегося мозга и формирование познавательной деятельности в онтогенезе ребенка. Физиология человека. 2009;35(6):10-24.
28. Мачинская РИ. Нейрофизиология когнитивного развития. История научного направления и лаборатории. Новые исследования. 2024;3(79):144-182. doi.org/-10.46742/2072-8840-2024-79-3-144-182
29. Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. Biological Psychology. 2000;54(1-3):241-57. doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00058-2
30. Gómez-Pérez E, Ostrosky-Solís F, Próspero-García O. Desarrollo de la atención, la memoria y los procesos inhibitorios: relación temporal con la maduración de la estructura y función cerebral. Rev Neurol. 2003;37(6):561-7. doi.org/10.33588/rn.3706.2003092

Ассоциативті оқытудың жас ерекшеліктеріне байланысты психофизиологиялық ерекшеліктері

Д. Абдильманов¹, Г.К. Датхабаева¹, М. Жолдасова¹, А.М. Кустубаева*¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Ассоциативті оқыту – бейімделгіш мінез-құлық пен қауіпсіз өмірді қамтамасыз ететін танымдық функция. Ол ақпаратты өңдеуге, экзекүтивті бақылауға, сенсомоторлық координацияға, марапаттаумен жазалаудың субъективті тәжірибесіне жауап беретін мидың мүдделі аймақтарының нейрондық желілерін біріктірген когнитивті процестердің жиынтығын қамтиды және олардың өзара және кері байланыс сигналдары арасындағы интеграциясына байланысты. Когнитивті функцияның қалыпты дамуының психофизиологиялық заңдылықтарын анықтау оның механизмдерін түсінуге, жас нормаларын белгілеуге және дамудағы ауытқуларды ерте анықтау үшін маңызды. Зерттеудің мақсаты – детерминистік мінез-құлық оқыту моделін пайдалана отырып, балалардағы күшейтілген оқытудың мінез-құлық көрсеткіштерінің жас динамикасын зерттеу. Көру стимулдарына сенсомоторлық реакцияның (СР) жылдамдығы ересек балаларда айтарлықтай жоғары екендігі анықталды және СР-нің уақытша динамикасы жасына қарай өзгереді: СР оқытудың алғашқы кезеңдерінде екі жас тобында да өседі, ал кейінірек ол кіші балаларда төмендейді және үлкендерде «бір қалыпты» деңгейді көрсетті. Оқытудың ерте және кеш кезеңдеріндегі СР ауытқуының заңдылығының ұқсастығы көрсетілді: екі жас тобында да ерте кезеңдерге қарағанда оқытудың кеш кезеңдеріндегі СР жоғарылады. Жасқа байланысты байқалған заңдылықтар оқыту механизмдерінің даму ерекшеліктерін көрсетуі мүмкін. Алынған нәтижелер балалардың дамуының бұзылуын диагностикалаудың заманауи тәсілдерін әзірлеуге, оқытуда уақтылы түзетуге және мектептегі оқу жүктемесін жоспарлауға пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: ассоциативті оқыту, бекіту, когнитивті функцияларды дамыту, жас динамикасы, психофизиологиялық сипаттамалар

Age-related psychophysiological parameters of associative learning with reinforcement

D. Abdilmanov¹, G.K. Datkhabayeva¹, M. Zholdassova¹, A.M. Kustubayeva^{*1}

¹*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

Abstract. Associative learning is a cognitive function that ensures adaptive behavior and safe functioning. It includes a set of cognitive processes involving neural networks of interested areas of the brain responsible for information processing, executive control, sensorimotor coordination, and the subjective experience of reward and punishment, and depends on their integration with each other and feedback signals. The identification of psychophysiological patterns of the normal development of cognitive function is important for understanding its mechanisms, establishing age norms, and early identification of developmental abnormalities. The research aims to study the age-related dynamics of learning with reinforcement in children using a deterministic learning paradigm. It was revealed that the rate of sensorimotor reaction (SR) to visual stimuli is significantly higher in older children, and the temporal dynamics of SR change with age: at the early stages of learning, SR increases in both age groups, and at the later stages, it decreases in younger children and reaches a "plateau" in older children. The similarity of the pattern of SR fluctuations in the early and late stages of learning is shown: SR growth in the late stages of learning relative to the early ones in both age groups. The observed age patterns may indicate the peculiarities of the development of learning mechanisms. The results obtained can be useful for the development of modern approaches to the diagnosis of developmental disorders in children, their correction in the learning process, and in planning the educational load at school.

Keywords: associative learning, reinforcement, development of cognitive functions, age dynamics, psychophysiological characteristics

References

1. Nussenbaum K, Hartley CA. Reinforcement learning across development: What insights can we draw from a decade of research? *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2020; 45:100832. doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100733
2. Gerraty RT, Davidow JY, Foerde K, Galvan A, Bassett DS, Shohamy D. Dynamic Flexibility in Striatal-Cortical Circuits Supports Reinforcement Learning. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(10):2442-2453. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2084-17.2018
3. Kustubayeva AM, Nelson EB, Smith ML, Allendorfer JB, Eliassen JC. Functional MRI study of feedback-based reinforcement learning in depression. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2022;6:1. doi.org/10.3389/fninf.2022.1028121
4. Marco-Pallarés J, Müller SV, Münte TF. Learning by doing: an fMRI study of feed-back-related brain activations. *Neuroreport*. 2007;18(14):1423-6. doi.org/10.1097/WNR.-0b013e3282e9a58c
5. Yael Niv. Reinforcement learning in the brain. *Journal of Mathematical Psychology*. 2009;53(3):139-154. https://doi.org/10.1016/j.jmp.2008.12.005
6. Eliassen JC, Lamy M, Allendorfer JB, et al. Selective role for striatal and prefrontal regions in processing first trial feedback during single-trial associative learning. *Brain Research*. 2012;1458:56-66. doi.org/10.1016/j.brainres.2012.04.010
7. Rodriguez Buritica JM., Eppinger B, Heekeren HR. et al. Observational reinforcement learning in children and young adults. *npj Science of Learning*. 2024;9(18). doi.org/10.1038/s41539-024-00227-9

8. Lauzon SA, Abraham AE, Curcin K, Butler BE, Stevenson RA. The relationship between multisensory associative learning and multisensory integration. *Neuropsychologia*. 2022;174:108336. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108336
9. Pechtel P, Pizzagalli DA. Disrupted reinforcement learning and maladaptive behavior in women with a history of childhood sexual abuse: a high-density event-related potential study. *JAMA Psychiatry*. 2013;70(5):499-507. doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2013.728
10. Shephard E, Jackson GM, Groom MJ. Electrophysiological correlates of reinforcement learning in young people with Tourette syndrome with and without co-occurring ADHD symptoms // *International Journal of Developmental Neuroscience*. 2016;51:17-27. doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2016.04.005
11. Lewis RG, Florio E, Punzo D, Borrelli E. The Brain's Reward System in Health and Disease. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2021;1344:57-69. doi.org/10.1007/978-3-030-81147-1_4
12. Brovelli A, Laksiri N, Nazarian B, Meunier M, Boussaoud D. Understanding the neural computations of arbitrary visuomotor learning through fMRI and associative learning theory. *Cerebral Cortex*. 2008;18:1485-1495. doi.org/10.1093/cercor/bhm198
13. Daw ND, O'Doherty JP, Dayan P, Seymour B, Dolan RJ. Cortical substrates for exploratory decisions in humans. *Nature*. 2006;441:876-879. doi.org/10.1038/nature04766
14. Palidis DJ, Gribble PL. EEG correlates of physical effort and reward processing during reinforcement learning. *Journal of Neurophysiology*. 2020;124(2):610-622. doi.org/10.1152/jn.00370.2020
15. Subramanian A, Chitlangia S, Baths V. Reinforcement learning and its connections with neuroscience and psychology. *Neural Networks*. 2022;145:271-287. doi.org/10.1016/j.neunet.2021.10.003
16. Christakou A, Gershman SJ, Niv Y, Simmons A, Brammer M, Rubia K. Neural and Psychological Maturation of Decision-making in Adolescence and Young Adulthood. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2013;25(11):1807-1823. doi.org/10.1162/jocn_a_00447
17. Aleksandrov YUI. Psikhofiziologicheskiye zakonomernosti obucheniya i metody obucheniya [Psychophysiological patterns of learning and teaching methods]. *Psikhologicheskiy zhurnal* [Psychological journal]. 2012;33(6):5-19. [in Russian]
18. Deoni SCL, Dean DC, Remer J, Dirks H, O'Muircheartaigh J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *NeuroImage*. 2015;115:147-161. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.058
19. Paus T. Functional anatomy of arousal and attention systems in the human brain. *Progress in Brain Research*. 2000;126:65-77. doi.org/10.1016/S0079-6123(00)26007-X
20. Caviness VJr, Kennedy DN, Richelme C, Rademacher J, Filipek PA. The human brain age 7-11 years: a volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex*. 1996;6(5):726-36. doi.org/10.1093/cercor/6.5.726
21. Kelly C, Ball G, Matthews LG, et al. Investigating brain structural maturation in children and adolescents born very preterm using the brain age framework. *Neuroimage*. 2022;247:118828. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118828
22. Buyanova IS, Arsalidou M. Cerebral White Matter Myelination and Relations to Age, Gender, and Cognition: A Selective Review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021;15:662031. doi.org/10.3389/fnhum.2021.662031
23. Ball G, Kelly CE, Beare R, Seal ML. Individual variation underlying brain age estimates in typical development. *Neuroimage*. 2021;15(235):118036. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118036
24. Machinskaya RI, Krupskaya EV. Sozrevaniye regulatorynykh struktur mozga i organizatsiya vnimaniya u detey mladshego shkol'nogo vozrasta [Maturation of regulatory structures of the brain and organization

of attention in children of primary school age]. Kognitivnyye issledovaniya: sb. nauch. trudov [Cognitive research: collection of scientific papers] M.: Izd-vo Instituta psikhologii RAN; 2008;2:32–48. [in Russian]

25. Van Leijenhorst L, Gunther Moor B, Op de Macks ZA, et al. Adolescent risky decision-making: neurocognitive development of reward and control regions. *Neuroimage*. 2010;51(1):345-55. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.038

26. Snook L, Paulson LA., Roy D, et al. Diffusion tensor imaging of neurodevelopment in children and young adults. *Neuroimage*. 2005;26:1164–1173. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.03.016

27. Bezrukikh MM., Machinskaya RI., Farber DA. Strukturno-funktsional'naya organizatsiya razvivayushchegosya mozga i formirovaniye poznavatel'noy deyatel'nosti v ontogeneze rebenka. [Structural and functional organization of the developing brain and the formation of cognitive activity in the ontogenesis of a child] *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2009;35(6):10-24. [in Russian]

28. Machinskaya R.I. Neyrofiziologiya kognitivnogo razvitiya. Istoriya nauchnogo napravleniya i laboratorii [Neurophysiology of cognitive development. History of the scientific direction and laboratory]. *Novyye issledovaniya* [New research]. 2024;3(79):144-182. doi.org/10.46742/2072-8840-2024-79-3-144-182 [in Russian]

29. Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*. 2000;54(1-3):241-57. doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00058-2

30. Gómez-Pérez E, Ostrosky-Solís F, Próspero-García O. Desarrollo de la atención, la memoria y los procesos inhibitorios: relación temporal con la maduración de la estructura y función cerebral [The development of attention, memory and the inhibitory processes: the chronological relation with the maturation of brain structure and functioning]. *Rev Neurol*. 2003;37(6):561-7. doi.org/10.33588/rn.3706.2003092 [Spanish]

Сведения об авторах:

Абдильманов Данияр – докторант кафедры биофизики, биомедицины и нейронауки Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Датхабаева Гаухар Кубеновна – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры биофизики, биомедицины и нейронауки Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Жолдасова Манзура Кенесбекқызы – PhD, ассоциированный профессор, научный сотрудник Института мозга Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Кустубаева Альмира Мэлсовна – автор-корреспондент, кандидат биологических наук, профессор, директор Института мозга Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Абдильманов Данияр – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, биофизика, биомедицина және нейроғылым кафедрасының докторанты, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Датхабаева Гаухар Кубеновна – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, биофизика, биомедицина және нейроғылым кафедрасының аға оқытушысы, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Жолдасова Манзура Кенесбекқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Ми Институтының ғылыми қызметкері, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Кустубаева Альмира Мэлсовна – хат-хабар авторы, биология ғылымдарының кандидаты, профессор, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Ми Институтының директоры, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Information about the authors:

Abdilmanov Daniyar – PhD student, Department of Biophysics, Biomedicine and Neuroscience, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Datkhabayeva Gaukhar – PhD, Senior Lecturer, Department of Biophysics, Biomedicine and Neuroscience, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Zholdassova Manzura – PhD, associate professor, researcher, Brain Institute, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Kustubayeva Almira – Corresponding author, candidate of biological sciences, professor, Director of the Brain Institute of Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave. 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.



XҒТАР: 34.27.51: 34.27.17

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-76-86>

Ғылыми мақала

Пробиотикалық препараттың дисбактериоз жағдайындағы терапиялық белсенділігін зерттеу

Б.Т. Байқоныс*¹, Д.Е. Құрманғали¹, Туякова А.К.¹, Ж.М. Бекшин¹, Г.К. Абитаева¹

¹Микроорганизмдердің республикалық коллекциясы, Астана, Қазақстан

Аңдатпа. Ішек микробиотасының теңгерімсіздігі көптеген созылмалы аурулардың дамуына әкелуі мүмкін, сондықтан оның қалыпты құрамын қалпына келтіру бүгінгі таңда өзекті мәселелердің бірі болып саналады. Пробиотикалық терапия ішек биоценозын тиімді реттеудің ғылыми негізделген және қауіпсіз әдісі ретінде кеңінен зерттелуде. Осы бағытта пробиотиктің терапиялық белсенділігін бағалау мақсатында антибиотиктермен индуцирленген ішек дисбактериозы жағдайында зерттеліп отырған препараттың құрғақ ұнтағы *in vivo* модельде зерттелді. Зерттеу үшін салмағы 200–300 г аралығындағы әр жыныстағы ақ, тұқымсыз зертханалық егеуқұйрықтар қолданылды. Эксперименттің 1, 8, 14 және 18-ші күндерінде ішек микробиотасын микробиологиялық зерттеулерге арналған биологиялық материал (нәжіс) алынды. Жануарлар келесі топтарға бөлінді: бақылау тобы (оң бақылау – физиологиялық ерітінді) және эксперименттік топ (пробиотик 1×10^9 КҚБ/г). Нәжіс құрамына микробиологиялық зерттеулер жүргізу үшін 8 түрлі селективті қоректік ортаға себінділер жасалды. Дисбактериоз кезеңінде шартты-патогенді микроорганизмдер – *Clostridium* spp. және *Salmonella* spp. (бақылау тобында $9,75 \pm 0,31$ lg КҚБ/г), *Staphylococcus* spp. ($8,13 \pm 0,27$ lg КҚБ/г), *Enterococcus* spp. ($8,58 \pm 0,32$ lg КҚБ/г), *Klebsiella* spp. және *Enterobacter* spp. ($9,03 \pm 0,48$ lg КҚБ/г), *E. coli* ($8,46 \pm 0,45$ lg КҚБ/г) айтарлықтай артты. Ал емдеу кезеңінің соңында эксперименттік топта бұл көрсеткіштердің едәуір төмендеуі байқалды: *Clostridium* spp. – $7,91 \pm 0,34$ lg КҚБ/г, *Staphylococcus* spp. – $6,07 \pm 0,30$ lg КҚБ/г, *Klebsiella* spp. – $5,33 \pm 0,56$ lg КҚБ/г, *E. coli* – $6,92 \pm 0,44$ lg КҚБ/г. Сонымен қатар, пайдалы *Lactobacillus* spp. саны бастапқы $8,57 \pm 0,37$ lg КҚБ/г көрсеткіштен соңында $9,00 \pm 0,50$ -ге lg КҚБ/г дейін артқанын көрсетті. Жануарларға жүргізілген зерттеулер нәтижесінде, лактобактерияларға негізделген жаңа пробиотиктің антибиотикпен индуцирленген ішек дисбактериозын түзетуде тиімділік көрсетіп, микробиомның тепе-теңдігін қалпына келтіруге ықпал ететінін дәлелдеді. **Түйін сөздер:** пробиотик, дисбактериоз, ішек микробиотасы, микробиологиялық талдау, микрофлора теңгерімі, терапиялық белсенділік

Түсті: 09.06.2025. Қабылданды: 30.09.2025. Онлайн қол жетімді: 30.09.2025.

*Корреспондент автор: temirlanbaikonys1@gmail.com

Кіріспе

Адам ағзасындағы ішек микробиотасы көптеген физиологиялық үдерістерге, соның ішінде қоректік заттардың сіңірілуіне, иммундық жауаптың реттелуіне және метаболизмге тікелей әсер етеді. Ішек микрофлорасының теңгерімсіздігі немесе дисбактериоз семіздік, қант диабеті, қабыну аурулары және нейродегенеративті бұзылыстар сияқты әртүрлі патологиялық жағдайлардың дамуымен байланысты [1].

Пробиотиктер – жеткілікті мөлшерде қабылданған жағдайда, ағза иесіне пайдалы әсер ететін тірі микроорганизмдер. Олар ішек микробиотасының құрамын қалпына келтіріп, патогенді бактериялардың өсуін тежейді. Осылайша, ағзада иммундық және метаболикалық тепе-теңдіктің сақталуына ықпал етеді [2].

Соңғы жылдары пробиотиктердің ішек микробиотасына әсер ету механизмі молекулалық және иммунологиялық тұрғыдан жан-жақты зерттелуде. Пробиотиктер патогенді микроорганизмдердің өсуін тежеп қана қоймай, сонымен қатар ішек тосқауылының қызметін күшейтіп, метаболизм мен иммундық жауапты реттеуге қатысатыны дәлелденген [3,4].

Сонымен қатар, пробиотик құрамындағы тірі микроорганизмдердің штамдық ерекшеліктері олардың клиникалық тиімділігіне тікелей әсер етеді. Қазіргі зерттеулерде көпкомпонентті және синбиотикалық препараттардың артықшылығы көрсетілген [5,6].

Көптеген клиникалық және тәжірибелік зерттеулер пробиотиктердің ішек микрофлорасын қалыпқа келтірудегі, ішек ауруларының белгілерін жеңілдетудегі және жалпы денсаулықты жақсартудағы рөлін дәлелдеді. Мысалы, *Lactobacillus* және *Bifidobacterium* штамдары ішек қабырғасын нығайтып, қабынуға қарсы әсер көрсетеді және ішектің иммундық жүйесін белсендіреді [7].

2023 жылы жүргізілген мета-талдау нәтижелері бойынша, пробиотиктерді қабылдау ішек дисбактериозы бар науқастарда іштің кебуі, ауыруы және іш өту секілді белгілердің айтарлықтай төмендеуіне алып келгені анықталған [8]. Сонымен қатар, пробиотиктердің ұзақ мерзімді қолданылуы микробиотаның әртүрлілігін арттырып, патогенді микроорганизмдердің белсенділігін төмендетуге мүмкіндік береді [9].

Ішек дисбактериозын емдеуде пробиотиктердің нақты дозасы мен штамдық құрамы маңызды рөл атқарады. Клиникалық зерттеулер көрсеткендей, көп штаммды пробиотикалық кешендер моноштаммды препараттарға қарағанда анағұрлым тиімді әсер береді. Бұл олардың синергиялық әсерлеріне байланысты болуы мүмкін [10].

Қазіргі таңда пробиотиктердің тек ішек микрофлорасына ғана емес, сонымен қатар иммундық жауапты реттеуге, ішек тосқауылының тұтастығын сақтауға және метаболизмге әсер етуі кеңінен зерттелуде [11,12].

Алайда, пробиотиктердің тиімділігі олардың дозасына, штамдық құрамына және қолдану ұзақтығына байланысты өзгеріп отырады. Сондықтан, нақты пробиотикалық кешендердің дисбактериоз жағдайында тиімділігін бағалау – маңызды ғылыми және практикалық міндеттердің бірі.

Зерттеудің негізгі мақсаты – антибиотиктермен индуцирленген ішек дисбактериозы жағдайында зерттеліп отырған құрғақ ұнтақ түріндегі жаңа пробиотикалық препараттың терапевтік тиімділігін *in vivo* модельде бағалау және оның ішек микробиотасының қалпына келуіне әсерін микробиологиялық әдістер арқылы анықтау.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Пробиотикалық бактериялар

Зерттеліп отырған пробиотикалық препараттың құрамына кіретін *Lactobacillus plantarum* 5 LB, *Lactobacillus paracasei* 2 LB, *Lactobacillus fermentum* BV-4 және *Lactobacillus brevis* 3 LB штаммдары «Микроорганизмдердің республикалық коллекциясы» ЖШС-нің өнеркәсіптік микроорганизмдердің ұлттық биобанк депозитарийінен алынды. Пробиотикалық препараттың құрамына кіретін штаммдардың генетикалық және пробиотикалық қасиеттері алдыңғы зерттеулерде сипатталған [13].

Антибиотикпен шақырылған дисбактериозды модельдеу

Антибиотикпен шақырылған дисбактериоз моделін жасау үшін егеуқұйрықтарға пероральды түрде ампициллин (15 мг/кг) және метронидазол (10 мг/кг) 7 күн бойы енгізу арқылы индуцирленді.

Зерттеу дизайны

Зерттеу жұмысына салмағы 200–300 г аралығындағы ересек ақ лабораториялық егеуқұйрықтардың (*Rattus norvegicus*) 20 басы қолданылды.

Жануарлар кездейсоқ түрде екі топқа бөлінді (әр топта 10 жануардан: 5 аталық және 5 аналық): Бақылау тобы – антибиотик қабылдап, 0,15M NaCl алатын жануарлар тобы; Эксперименттік топ – антибиотик қабылдағаннан кейін пробиотикпен ем жүргізілген (1×10^9 КҚБ/г дозасында).

8-күннен бастап кейінгі 10 күн бойы бақылау тобына күн сайын 1,5 мл көлемінде физиологиялық ерітінді енгізілді. Ал эксперименттік топқа дәл осы көлемде физиологиялық ерітіндіде ерітілген 1×10^9 КҚБ/г дозасындағы пробиотик енгізілді.

Микробиологиялық зерттеулерге арналған сынамалар тәжірибенің 1-ші, 7-ші және 1-ші күндері алынды.

Эксперимент барысында жануарлардың физикалық белсенділігі, дене салмағы, тәбеті және нәжісінің сипаты үнемі бақылауда болды. Биологиялық материал үлгілер зерттеуге дейін -80 °C температурада сақталды. Жануарлар үлгісін қолдану адам ағзасындағы ішек микрофлорасының өзгерістерін модельдеу үшін кеңінен қолданылады. Бұл тәсіл *in vivo* жағдайында пробиотиктің нақты әсерін бақылауға мүмкіндік береді және халықаралық тәжірибеде стандарт ретінде қабылданған [14,15]. Барлық *in vivo* тәжірибелер зертханалық жануарлармен жұмыс істеудің этикалық қағидаттарына сәйкес жүргізілді.

Этикалық аспектілер

Зерттеу барысында Дүниежүзілік жануарларды қорғау қоғамының (WSPA) ұсынымдары, ғылыми мақсатта пайдаланылатын омыртқалы жануарларды қорғау жөніндегі Еуропалық конвенцияның (ETS №123, Страсбург, 1986 ж.) талаптары, сондай-ақ биоэтика жөніндегі жергілікті комитет бекіткен эксперименттік жануарларды пайдалану тәртібі туралы ереже басшылыққа алынды [16,17].

Бактериологиялық зерттеу әдістері

Ішек микрофлорасының сандық және сапалық құрамын бағалау үшін алынған биологиялық материал үлгілері Miles & Misra әдісі бойынша қоректік орталарға егіліп сандық концентрациясы анықталды [18].

Микробиологиялық зерттеулер

Әрбір үлгіден 1 г биологиялық материал 1 мл 0,9% физиологиялық ерітіндімен гомогенизацияланып, 40-60 минут бөлме температурасында тұруға қалдырылды. Осыдан кейін 10^{-3} , 10^{-5} және 10^{-7} сұйылту қатарлары дайындалып, 50 мкл көлемде әртүрлі қоректік орталарға себілді.

Қолданылған қоректік орталар (барлығы 8 түрлі): Сабуро агары; Симмонс цитрат агары; Висмут-сульфит агары; Стафилококты агар; *E. coli* анықтауға арналған хромогенді агар; Энтерококты агар; ЕПА (ет-пептонды агар); МРШ агары (Манн-Рогоза-Шарп).

Инкубация 37°C температурада 24–48 сағат бойы жүргізілді. Колониялардың морфологиясы, түсі, мөлшері және өсу сипаттамалары тіркелді. Сандық көрсеткіштер КҚБ/г (колония құраушы бірлік) бірлігінде есептелді [19].

Статистикалық талдау

Зерттеу нәтижелері сандық көрсеткіштер ретінде орташа мән және стандартты ауытқу ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) форматында берілді. Әрбір эксперименттік топ бойынша жүргізілген зерттеу үш тәуелсіз қайталаумен расталды. Статистикалық өңдеулерді жүзеге асыру үшін GraphPad Prism 10 (GraphPad Software, АҚШ) бағдарламалық құралы пайдаланылды. Топтар арасындағы айырмашылықтың сенімділігін бағалау мақсатында Стьюденттің t-тесті қолданылып, орташа мәндердегі айырмашылығы $p < 0,05$ құрады.

Нәтижелер

Дисбактериоз кезінде микрофлораның сипаттамалық көрінісі облигатты микрофлораның мөлшерінің төмендеуімен және факультативті, шартты-патогенді микрофлораның мөлшерінің артуымен сипатталады. Зертханалық жануарлардың дене салмағын бақылау – антибиотикпен индуцирленген дисбактериозды модельдеуде маңызды параметр болып табылады. Доксициклин немесе ампициллин тәрізді антибактериалды препараттарды енгізу ішек микробиоценозының бұзылуына әкеліп, бұл өз кезегінде жануарлардың дене салмағының төмендеуімен, тәбеттің нашарлауымен және жалпы гиподинамиямен сипатталады. Жануарларды жүйелі түрде өлшеу олардың жағдайының динамикасын бақылауға және бұзылулардың айқындылық дәрежесін объективті бағалауға мүмкіндік береді [20,21]. 1-кестеде келтірілген нәтижелер эксперименттік топтар мен бақылау тобы арасында егеуқұйрықтардың дене салмағының айтарлықтай айырмашылығы болмағанын көрсетеді.

Кесте 1

Ішек дисбактериозын модельдеу кезінде егеуқұйрықтарға асқазан арқылы бактерияға қарсы препараттарды енгізу және емдеу барысында дене салмағын бақылау

Зерттелетін топтар	Егеуқұйрықтардың бастапқы дене салмағы, г	Егеуқұйрықтардың дене салмағы 7-тәулікте, г	Егеуқұйрықтардың дене салмағы 14-тәулікте, г
Бақылау тобы, ♀, n=5	213,2±7,1	224,6±6,4	255,2±10,6
Бақылау тобы, ♂, n=5	308,2±7,8	317,6±7,4	341,2±4,8
Эксперименттік топ, ♀, n=5	214±6,7 p=0,937	226±8,7 p=0,843	254±8,4 p=0,931
Эксперименттік топ, ♂, n=5	296±10,1 p=0,368	303,2±10,8 p=0,303	331,2±13,3 p=0,499
Ескертпе: ♀ – аналық жынысты жануарларды білдіретін белгі; ♂ – аталық жынысты жануарларды білдіретін белгі; p – маңыздылық деңгейі, p<0,05 – бақылау тобындағы тиісті мәндермен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан маңызды айырмашылықтар; n – топтағы жануарлар саны.			

Дисбактериоз кезеңінде жиналған биоматериалды орталарға егу нәтижесінде егеуқұйрықтардың ішектерінде патогенді микроорганизмдер мөлшерінің (10^8 – 10^9 КҚБ/мл) артқаны байқалды, бұл ішек микрофлорасы балансының бұзылғанын көрсетеді.

Ішек микробиоценозындағы микробтық популяцияларды зерттеу барысында, зерттеулер басталғанға дейін микрофлора құрамы норманың шегінде болғаны анықталды (2-кесте).

Кесте 2

Бақылау және тәжірибелік топтардағы орташа колония түзуші бірліктер санының (КҚБ/г) өзгерісі

Көрсеткіш (lg КҚБ/г)	Топтар	Бастапқы көрсеткіш	Дисбактериоз кезіндегі көрсеткіш	Аралық көрсеткіш	Қорытынды көрсеткіш
<i>Yeasts & Fungi</i> (Сабыро)	Бақылау тобы	8,69±0,64	9,62±0,45	8,41±0,37	8,24±0,36
	Эксперименттік топ	8,69±0,64	9,09±0,60	8,23±0,26	8,10±0,41
<i>Lactobacillus</i> spp. (MP)	Бақылау тобы	8,57±0,37	8,83±0,22	8,31±0,22	8,54±0,42
	Эксперименттік топ	8,57±0,37	8,79±0,27	8,99±0,56	9,00±0,50
<i>Clostridium</i> spp. & <i>Salmonella</i> spp. (Висмут-сульфит)	Бақылау тобы	4,98±0,50	9,75±0,31	8,06±0,39	7,95±0,05
	Эксперименттік топ	4,98±0,50	9,23±0,55	8,17±0,49	7,91±0,34

<i>Staphylococcus</i> spp.	Бақылау тобы	4,51±0,40	8,13±0,27	7,34±0,36	6,69±0,42
	Эксперименттік топ	4,51±0,40	8,08±0,36	7,36±0,41	6,07±0,30
<i>Enterococcus</i> spp.	Бақылау тобы	6,11±0,42	8,58±0,32	8,46±0,50	8,10±0,36
	Эксперименттік топ	6,11±0,42	8,49±0,32	8,11±0,45	7,81±0,34
<i>Klebsiella</i> spp., <i>Enterobacter</i> <i>Salmonella</i> spp. (Симмонс цитрат агары)	Бақылау тобы	4,96±0,54	9,03±0,48	6,93±0,31	6,00±0,52
	Эксперименттік топ	4,96±0,54	8,57±0,57	6,03±0,31	5,33±0,56
<i>Escherichia coli</i>	Бақылау тобы	5,88±0,48	8,46±0,45	7,37±0,32	7,91±0,48
	Эксперименттік топ	5,88±0,48	8,04±0,36	7,11±0,50	6,92±0,44
Жалпы микробтық саны (ЕПА)	Бақылау тобы	8,26±0,36	9,56±0,54	8,45±0,29	8,47±0,22
	Эксперименттік топ	8,26±0,36	9,28±0,24	9,23±0,58	7,86±0,36

Зерттеу нәтижелері ішек дисбактериозын модельдеу кезінде пробиотикті қолданудың тиімділігін растады. Антибактериалды препарат енгізілгеннен кейін шартты-патогенді микроорганизмдер (*Clostridium* spp., *Staphylococcus* spp., *Klebsiella* spp., *Enterobacter* spp., *E. coli*) санының едәуір артқаны байқалды. Атап айтқанда, *Clostridium* spp. және *Salmonella* spp. $9,23 \pm 0,55$ lg КҚБ/г, *Staphylococcus* spp. – $8,08 \pm 0,36$ lg КҚБ/г, *Klebsiella* spp. және *Enterobacter* spp. – $8,57 \pm 0,57$ lg КҚБ/г, *E. coli* – $8,04 \pm 0,36$ lg КҚБ/г деңгейіне жетті.

Пробиотик енгізілген эксперименттік топта емдеу курсы аяқталған соң бұл көрсеткіштердің төмендеуі тіркелді: сәйкесінше, *Clostridium* spp. және *Salmonella* spp. – $7,91 \pm 0,34$ lg КҚБ/г, *Staphylococcus* spp. – $6,07 \pm 0,30$ lg КҚБ/г, *Klebsiella* spp. және *Enterobacter* spp. – $5,33 \pm 0,56$ lg КҚБ/г, *E. coli* – $6,92 \pm 0,44$ lg КҚБ/г.

Сонымен қатар, пробиотиктің ішек микробиоценозының сапалық құрамына оң әсері байқалды: *Lactobacillus* spp. мөлшері емдеу соңында $9,00 \pm 0,50$ lg КҚБ/г дейін артты, бұл бастапқы көрсеткішпен ($8,57 \pm 0,37$ lg КҚБ/г) салыстырғанда айтарлықтай жоғары. Нәтижесінде ішек микрофлорасындағы *Lactobacillus* spp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus* spp., *Enterococcus* spp., *Klebsiella* spp. және басқа да түрлердің үлесі нақты анықталды.

Талқылау

Жүргізілген тәжірибе нәтижелері пробиотикалық препаратты қабылдағаннан кейін ішек микробиотасының қалпына келу үдерісі белсенді жүретінін көрсетті. Бұл әсіресе пайдалы микрофлора – *Lactobacillus* spp. популяцияларының өсуімен және шартты-патогенді микроорганизмдердің азаюымен көрінеді [22–23].

Алынған мәліметтер пробиотиктің ішек қабырғасын нығайту, микробиота әртүрлілігін арттыру және патогенді штамдарға қарсы тосқауылдық әсерін растайды. Мұндай әсерлер пробиотиктің құрамындағы органикалық қышқылдар мен антимикробтық метаболиттер өндірісіне байланысты болуы мүмкін [24–28].

Сонымен қатар, ішек микробиотасының толық қалпына келуі үшін пробиотикті ұзақ мерзімді қолдану қажеттігі байқалады. Бұл жайт бұрын жүргізілген зерттеулермен де

сәйкес келеді, онда пробиотиктердің әсері уақытқа және қолдану ұзақтығына тәуелді екені атап өтілген [29–31]. Бұл өзгерістер пробиотикалық терапияның ішектің қалыпты микрофлорасын қалпына келтіруге оң әсер ететінін көрсетеді.

Алынған деректер пробиотиктерді дисбактериозды түзетуге және ішек микробиотасының жағдайын жақсартуға қолданудың тиімділігін растайды, бұл өз кезегінде науқастың саулығын қалпына келтіруге ықпал етуі мүмкін.

Қорытынды

Дисбактериозды он күн бойы пробиотикпен емдеу ішек микрофлорасының құрамына оң әсер етіп, емдеу аяқталғаннан кейін микробиотада оң өзгерістердің байқалуын көрсетті. Алайда, микроорганизмдер арасындағы толық тепе-теңдік толық қалпына келмегені байқалады. Бұл микробиотаны ұзақ уақыт бойы пробиотиктермен қосымша қолдаудың маңыздылығын көрсетеді.

Авторлардың қосқан үлесі

Б.Т.Б. – тұжырымдамалау, әдістеме, мақала мәтінін жазды, ғылыми жұмысты жалпы үйлестіріп, негізгі мазмұн мен құрылымын қалыптастырды; **Қ.Д.Е.** – тұжырымдамалау, әдістеме, мақаланы сыни тұрғыдан қайта қарау; **Т.А.К.** – тұжырымдама мен әдіснаманы дайындады; **Б.Ж.М.** – жобаны басқаруды қадағалады; **А.Г.К.** – жобаны әкімшілендіруге жетекшілік етті, тұжырымдама мен әдіснаманы дайындады, мақаланы сыни тұрғыдан қайта қарады.

Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AR 19679863).

Мүдделер қақтығысы

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Этикалық нормаларды сақтау

Жануарларға жүргізілген зерттеулерде барлық рәсімдер мекеменің этикалық нормаларына, сонымен қатар ҚР және халықаралық ұйымдардың бекітілген нормативтік құқықтық актілеріне сәйкес келеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Fan Y, Pedersen O. Gut microbiota in human metabolic health and disease. *Nature Reviews Microbiology*. 2021;19(1):55–71. doi.org/10.1038/s41579-020-0433-9
2. Marchesi JR, Adams DH, Fava F, et al. The gut microbiota and host health: a new clinical frontier. *Gut*. 2016;65(2):330–339. doi.org/10.1136/gutjnl-2015-309990
3. Sanders ME, Merenstein DJ, Reid G, et al. Probiotics and prebiotics in intestinal health and disease: from biology to the clinic. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2019;16(10):605–616. doi.org/10.1038/s41575-019-0173-3

4. Hill C, Guarner F, Reid G, et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2014;11(8):506–514. doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66
5. Markowiak P, Śliżewska K. Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. *Nutrients*. 2017;9(9):1021. doi.org/10.3390/nu9091021
6. Zmora N, Suez J, Elinav E. You are what you eat: diet, health and the gut microbiota. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2019;16(1):35–56. doi.org/10.1038/s41575-018-0061-2
7. Bentahar M, Benabdelmoumene D, Robert V et al. Evaluation of Probiotic Potential and Functional Properties of Lactobacillus Strains Isolated from Dhan, Traditional Algerian Goat Milk Butter. *Foods*. 2024; 13(23):3781. doi.org/10.3390/foods13233781
8. Bantayehu A, Bekalu K, et al. Probiotics, their prophylactic and therapeutic applications in human health development: A review of the literature. *Heliyon*. 2022;11:197-208. doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09725
9. Liu Y, Tran D, Rhoads J, et al. Probiotics in Disease Prevention and Treatment. *Journal of clinical pharmacology*. 2018;58(10):164–179. doi.org/10.1002/jcph.1121
10. Boyle RJ, Robins-Browne RM, Tang ML. Probiotic use in clinical practice: what are the risks? *Am J Clin Nutr*. 2006;83(6):1256-64. doi: 10.1093/ajcn/83.6.1256
11. Hill D, Artis D. Intestinal bacteria and the regulation of immune cell homeostasis. *Annu Rev Immunol*. 2010;28:623-67. doi.org/10.1146/annurev-immunol-030409-101330
12. Iliev I, Ananthakrishnan A, Guo C. Microbiota in inflammatory bowel disease: mechanisms of disease and therapeutic opportunities. *Nat Rev Microbiol*. 2025;23:509–524. doi.org/10.1038/s41579-025-01163-0
13. Kurmangali D, Baikonyas B, Abilkhadirov A, et al. Study of antimicrobial activity and tolerance to stress factors of Lactobacillus strains for the development of new probiotics. *BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. BIOSCIENCE Series*. 2024;149(4):93–109. doi.org/10.32523/2616-7034-2024-149-4
14. Saxelin M, Tynkkynen S, Mattila-Sandholm T, et al. Probiotic and other functional microbes: from markets to mechanisms. *Curr Opin Biotechnol*. 2005;16(2):204-211. doi.org/10.1016/j.copbio.2005.02.003
15. Arrieta MC, Walter J, Finlay BB. Human microbiota-associated mice: a model with challenges. *Cell Host Microbe*. 2016;19(5):575–578. doi.org/10.1016/j.chom.2016.04.014
16. Council of Europe. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes: Explanatory Report [Internet]. Strasbourg: Council of Europe; 1986 [cited 2025 Jul 29]. Available from: <https://rm.coe.int/168007a67b>
17. Nikolaos K, Arvaniti A, Dile X, et al. Legal framework on the protection, health and welfare of animals used for experimental and educational purposes. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*. 2017;58(3):270. doi.org/10.12681/jhvms.14991
18. Miles AA, Misra SS, Irwin JO. The estimation of the bactericidal power of the blood. *J Hyg (Lond)*. 1938;38(6):732-49. doi: 10.1017/s002217240001158x
19. Weisburg WG, Barns SM, Pelletier DA, et al. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *J Bacteriol*. 1991;173(2):697-703. doi.org/10.1128/jb.173.2.697-703.1991
20. Zvonareva NV, Pogozeva AV, Kutafina NV. Sposob korrektsii disbioza kishhechnika [Method for correction of intestinal dysbiosis] [Internet]. WO2012091598A1. 2012 [cited 2025 Jul 29]. Available from: <https://patents.google.com/patent/WO2012091598A1/ru>

21. Bobyr V, Stechenko L, Shyrobokov V, et al. Morphological Characteristics Of Small Intestine Mucosa In Dysbiosis And After Its Correction By Probiotics And Enterosorbents. Georgian Medical News. 2021;311:151-156. PMID: 33814410.
22. de Vos WM, Tilg H, Van Hul M, Cani PD. Gut microbiome and health: mechanistic insights. Gut. 2022;71(5):1020-1032. doi.org/10.1136/gutjnl-2021-326789.
23. Pandey KR, Naik SR, Vakil BV. Probiotics, prebiotics and synbiotics – a review. J Food Sci Technol. 2015;52(12):7577–7587. doi.org/10.1007/s13197-015-1921-1
24. Krumbeck JA, Rasmussen HE, Hutkins RW, et al. Probiotic Bifidobacterium strains and galactooligosaccharides improve intestinal barrier function in obese adults but show no synergism when used together as synbiotics. Microbiome. 2018;28(1):121. doi: 10.1186/s40168-018-0494-4.
25. Sanders ME, Benson A, Lebeer S, et al. Shared mechanisms among probiotic taxa: implications for general probiotic claims. Curr Opin Biotechnol. 2018;49:207–216. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.09.007>
26. El Hage R, Hernandez-Sanabria E, Van de Wiele T. Emerging Trends in "Smart Probiotics": Functional Consideration for the Development of Novel Health and Industrial Applications. Front Microbiol. 2017;29(8):1889. doi: 10.3389/fmicb.2017.01889
27. Gagliardi A, Totino V, Cacciotti F, et al. Rebuilding the gut microbiota ecosystem. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(8):1679. doi.org/10.3390/ijerph15081679
28. McFarland LV. From yaks to yogurt: the history, development, and current use of probiotics. Clin Infect Dis. 2015;60(2):85–90. doi.org/10.1093/cid/civ054
29. Khalesi S, Sun J, Buys N, et al. Effect of probiotics on blood pressure: a systematic review and meta-analysis of randomized, controlled trials. Hypertension. 2014;64(4):897–903. doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03469
30. Kho ZY, Lal SK. The human gut microbiome – a potential controller of wellness and disease. Front Microbiol. 2018;9:1835. doi.org/10.3389/fmicb.2018.01835
31. Liu Y, Tran DQ, Rhoads JM. Probiotics in disease prevention and treatment. J Clin Pharmacol. 2018;58(10):164–179. doi.org/10.1002/jcph.1121

Изучение терапевтической активности пробиотического препарата при дисбактериозе

Б.Т. Байқоныс^{*1}, Д.Е. Курманғали¹, А.К. Туякова¹, Ж.М. Бекшин¹, Г.К. Абитаева¹

¹Республиканская коллекция микроорганизмов, Астана, Казахстан

Аннотация. Дисбаланс кишечной микробиоты может способствовать развитию многих хронических заболеваний, поэтому восстановление её нормального состава на сегодняшний день является одной из актуальных задач. Пробиотическая терапия активно исследуется как научно обоснованный и безопасный метод эффективной регуляции кишечного биоценоза. В данном направлении сухой порошок исследуемого препарата был изучен *in vivo* на модели антибиотик-индуцированного дисбактериоза кишечника с целью оценки терапевтической активности пробиотика. В исследовании использовали белых беспородных лабораторных крыс обоих полов массой 200-300 г. Биологический материал (фекалии) для микробиологических исследований кишечной микробиоты отбирали на 1, 8, 14 и 18-й дни эксперимента. Животные были разделены на следующие группы: контрольная (положительный контроль

– физиологический раствор) и (пробиотик 1×10^9 КОЕ/г). Для микробиологического анализа содержимого фекалий были произведены посевы на восемь различных селективных питательных сред. В период дисбактериоза в контрольной группе наблюдалось достоверное увеличение количества условно-патогенных микроорганизмов: *Clostridium* spp. и *Salmonella* spp. – $9,75 \pm 0,31$ lg КОЕ/г, *Staphylococcus* spp. – $8,13 \pm 0,27$ lg КОЕ/г, *Enterococcus* spp. – $8,58 \pm 0,32$ lg КОЕ/г, *Klebsiella* spp. и *Enterobacter* spp. – $9,03 \pm 0,48$ lg КОЕ/г, *Escherichia coli* – $8,46 \pm 0,45$ lg КОЕ/г. К концу курса лечения в экспериментальной группе зафиксировано значительное снижение этих показателей: *Clostridium* spp. – $7,91 \pm 0,34$ lg КОЕ/г, *Staphylococcus* spp. – $6,07 \pm 0,30$ lg КОЕ/г, *Klebsiella* spp. – $5,33 \pm 0,56$ lg КОЕ/г, *E. coli* – $6,92 \pm 0,44$ lg КОЕ/г. Кроме того, число полезных *Lactobacillus* spp. увеличилось с начального уровня $8,57 \pm 0,37$ lg КОЕ/г до $9,00 \pm 0,50$ lg КОЕ/г. Проведённые исследования на лабораторных животных подтвердили эффективность нового пробиотика на основе лактобактерий при коррекции антибиотик-индуцированного кишечного дисбактериоза и восстановлении микробного гомеостаза.

Ключевые слова: пробиотик, дисбактериоз, кишечная микробиота, микробиологический анализ, баланс микрофлоры, терапевтическая активность

Study of the therapeutic activity of a probiotic preparation under conditions of dysbiosis

B.T. Baikonys^{*1}, D.E. Kurmangali¹, A.K. Tuyakova¹, Zh.M. Bekshin¹, G.K. Abitayeva¹

¹Republican Collection of Microorganisms, Astana, Kazakhstan

Abstract. An imbalance of the gut microbiota may lead to the development of many chronic diseases; therefore, restoring its normal composition is considered one of the most pressing issues today. Probiotic therapy is being extensively studied as a scientifically validated and safe method for effectively regulating the intestinal biocenosis. In this context, the therapeutic activity of a dry powder form of the studied probiotic preparation was evaluated in an in vivo model of antibiotic-induced gut dysbiosis. White outbred laboratory rats of both sexes, weighing 200-300 g, were used in the study. Fecal samples were collected on days 1, 8, 14, and 18 of the experiment for microbiological analysis of the gut microbiota. Animals were divided into the following groups: control (positive control – saline) and experimental group (probiotic 1×10^9 CFU/g). For the microbiological analysis of fecal contents, inoculations were performed on eight selective nutrient media. During the dysbiosis phase, the control group showed a significant increase in conditionally pathogenic microorganisms: *Clostridium* spp. and *Salmonella* spp. – 9.75 ± 0.31 lg CFU/g, *Staphylococcus* spp. – 8.13 ± 0.27 lg CFU/g, *Enterococcus* spp. – 8.58 ± 0.32 lg CFU/g, *Klebsiella* spp. and *Enterobacter* spp. – 9.03 ± 0.48 lg CFU/g, and *Escherichia coli* – 8.46 ± 0.45 lg CFU/g. At the end of the treatment phase, the experimental group showed a notable reduction in these values: *Clostridium* spp. – 7.91 ± 0.34 lg CFU/g, *Staphylococcus* spp. – 6.07 ± 0.30 lg CFU/g, *Klebsiella* spp. – 5.33 ± 0.56 lg CFU/g, *E. coli* – 6.92 ± 0.44 lg CFU/g. Additionally, the number of beneficial *Lactobacillus* spp. increased from the initial level of 8.57 ± 0.37 lg CFU/g to 9.00 ± 0.50 lg CFU/g. These findings demonstrate the efficacy of the new lactobacilli-based probiotic in correcting antibiotic-induced intestinal dysbiosis and in restoring microbial balance.

Keywords: probiotic, dysbiosis, gut microbiota, microbiological analysis, microbial balance, therapeutic activity

Авторлар туралы мәліметтер:

Байқоныс Т.Б. – хат-хабар авторы, ветеринария ғылымдарының магистрі, «Республикалық микроорганизмдер коллекциясы» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Ш.Уәлиханов көшесі 13/1, 020000, Астана қаласы, Қазақстан.

Құрманғали Д.Е. – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Республикалық микроорганизмдер коллекциясы» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Ш.Уәлиханов көшесі 13/1, 020000, Астана қаласы, Қазақстан.

Туякова А.К. – ғылыми қызметкер, «Республикалық микроорганизмдер коллекциясы» ЖШС, Ш.Уәлиханов көшесі 13/1, 020000, Астана қаласы, Қазақстан.

Бекшин Ж.М. – медицина ғылымдарының кандидаты, «Республикалық микроорганизмдер коллекциясы» ЖШС аға ғылыми қызметкері, Ш.Уәлиханов көшесі 13/1, 020000, Астана қаласы, Қазақстан.

Абитаева Г.К. – PhD, жоба жетекшісі, микроорганизмдердің генетикасы және биохимиясы зертханасының меңгерушісі, «Республикалық микроорганизмдер коллекциясы» ЖШС аға ғылыми қызметкері, Ш.Уәлиханов көшесі 13/1, 020000, Астана қаласы, Қазақстан.

Сведения об авторах:

Байқоныс Т.Б. – автор-корреспондент, магистр ветеринарных наук, младший научный сотрудник ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», улица Ш. Уалиханова, 13/1, 020000, Астана, Казахстан.

Құрманғали Д.Е. – магистр естественных наук, младший научный сотрудник ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», улица Ш. Уалиханова, 13/1, 020000, Астана, Казахстан.

Туякова А.К. – научный сотрудник, ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», улица Ш. Уалиханова, 13/1, 020000, Астана, Казахстан.

Бекшин Ж.М. – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», улица Ш. Уалиханова, 13/1, 020000, Астана, Казахстан.

Абитаева Г.К. – PhD, руководитель проекта, заведующий лабораторией генетики и биохимии микроорганизмов, старший научный сотрудник ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», улица Ш. Уалиханова, 13/1, 020000, Астана, Казахстан.

Information about the authors:

Baikonys T.B. – Corresponding author, Master of Veterinary Sciences, Junior researcher, "Republican Collection of Microorganisms" LLP, 13/1 Sh. Ualikhanov street, 020000, Astana, Kazakhstan.

Kurmangali D.E. – Master of Natural Sciences, Junior Researcher, "Republican collection of microorganisms" LLP, Sh. Ualikhanov street 13/1, 020000, Astana, Kazakhstan.

Tuyakova A.K. – Researcher, Republican Collection of Microorganisms LLP, Sh. Ualikhanov street 13/1, 020000, Astana city, Kazakhstan.

Bekshin Zh.M. – Candidate of Medical Sciences, senior researcher, "Republican Collection of Microorganisms" LLP, 13/1 Sh. Ualikhanov street, 020000, Astana, Kazakhstan.

Abitayeva G.K. – PhD, Project Manager, Head of Laboratory of Genetics and Biochemistry of Microorganisms, "Republican Collection of Microorganisms" LLP, 13/1 Sh. Ualikhanov street, 020000, Astana, Kazakhstan.



ХҒТАР 34.27.15

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-87-102>

Ғылыми мақала

***Trichoderma harzianum* саңырауқұлағының *Cytospora* туысына жататын саңырауқұлақтарға қатысты антагонистік белсенділік және изоляттардың филогенетикалық талдауы**

**А.Ж. Жаксылыков², К.А. Дюсембаев^{1,2}, С.К. Наекова^{1,2}, Ж. Нурбекова¹,
Ш.Е. Арыстанова¹, А.К. Оспанова³, В.С. Киян^{1,2}, Ж.А. Тулегенова^{*1,2}**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Ұлттық биотехнология орталығы, Астана, Қазақстан

³Әлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл зерттеуде *Trichoderma harzianum* саңырауқұлағының жеміс және орман ағаштарының некрозы және құрғауын тудыратын *Cytospora* туысының фитопатогенді саңырауқұлақтарға қарсы антагонистік белсенділігі бағаланды. *T. harzianum* культураларының морфологиялық сипаттамасы бойынша мицелийдің ерекше құрылысы мен белсенді спораланатынын көрсетті, бұл олардың қоректік ортаны тез игеретінін байқатты. Бірге отырғызып өсіру барысында *C. chrysosperma*, *C. sorbina*, *C. parasitica*, *C. pruinospora* патогендерінің өсуінің айқын тежелуі байқалды. Бұл құбылыс мицелий түсінің өзгеруімен, патоген колонияларының дамуының шектелуімен және ол патогендерді Петри табақшаларының негізгі аймақтарынан ығыстыруымен көрініс берді. Инкубацияның сегізінші тәулігінде *Cytospora* туысына жататын фитопатогенді саңырауқұлақтардың өсуі *Trichoderma harzianum* антагонисімен тежеліп, белсенді спора түзуімен қатар жүрді. ITS аймағын талдау негізіндегі молекулалық идентификация бөлініп алынған изоляттардың *T. harzianum* түріне жататынын растады (GenBank деректерімен 100 % ұқсастық). Құрылған филогенетикалық ағаш изоляттардың *T. harzianum* таксономиялық тобы құрамында жоғары бутстрэп-қолдауымен айқын кластерленуін көрсетті. Алынған нәтижелер *T. harzianum*-ды *Cytospora* туысына жататын фитопатогендерге қарсы өсімдіктердің биологиялық қорғанысының тиімді агенті ретінде қолдану болашағы зор екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, антагонистік қасиеттерді зерттеуде морфологиялық әрі молекулалық-генетикалық талдауды қамтитын кешенді тәсілдің маңыздылығын айқындайды.

Түйін сөздер: *Trichoderma harzianum*, *Cytospora* spp., антагонистік белсенділік, морфология, филогенетикалық талдау, биобақылау

Кіріспе

Cytospora туысына жататын саңырауқұлақтар әлем бойынша 130-дан астам ағаш өсімдіктерінде қабық некрозын, діңгек ісігін және өркендердің құрғауын тудыратын қауіпті фитопатогендер болып табылады [1–3]. Бұл қоздырғыштар әсіресе *Rosaceae*

Түсті: 23.09.2025. Қабылданды: 30.09.2025. Онлайн қол жетімді: 30.09.2025.

*Хат-хабар авторы: zhan.ta.enu@gmail.com

тұқымдасына жататын жеміс дақылдарына, соның ішінде алма, алмұрт және сүйекті жемістерге айтарлықтай зиян келтіріп, бақ шаруашылығында үлкен экономикалық шығындарға әкеледі [1,2]. Жоғары экологиялық бейімділік, кең иесі ауқымы және морфологиялық белгілердің ұқсастығы *Cytospora* өкілдерін дәстүрлі жолмен анықтауды қиындатады, сондықтан түрлік құрамды нақтылау үшін морфологиялық сипаттамалармен бірге көплокустық филогенетикалық талдау жиі қолданылады [3–5].

Дәстүрлі химиялық фунгицидтерді қолдануға негізделген күрес әдістері бірқатар шектеулермен байланысты: патогендердің төзімділігінің дамуы, экологиялық тәуекелдер және адам денсаулығына қауіптіліктің болуы [6–8]. Осыған байланысты биологиялық бақылау өсімдіктерді қорғаудың экологиялық әрі тиімді баламасы ретінде қарастырылады [7–9].

Ерекше назар *Trichoderma* туысына жататын саңырауқұлақтарға аударылады, олар көптеген фитопатогендерге қарсы айқын антагонистік белсенділікке ие [11–13]. Бұл саңырауқұлақтар жылдам өсуімен, бәсекеге қабілеттілігімен, антибиотиктерді, ұшатын және ұшпайтын метаболиттерді, сондай-ақ жасуша қабырғаларын бұзатын ферменттерді (хитиназа, β -1,3-глюканаза) түзу қабілетімен сипатталады [9, 11], сонымен қатар *Trichoderma* spp. саңырауқұлақтары өсімдіктердің өсуін ынталандырып, олардың жүйелік төзімділігін арттыратын қабілеті бар [6, 8].

Ағаш түрлерінің қауіпті деген ауруларының бірі – *Cytospora* spp. туысының өкілдері тудыратын цитоспоралы ісік. Ең көп зерттелген қоздырғыштың бірі *Cytospora chrysosperma* болып табылады, ол теректерді (*Populus* spp.), талдарды (*Salix* spp.) және басқа да ағаш діңгектерін зақымдайды. Ауру дің мен бұтақтарда ұзынша ісікті жаралар түрінде көрініп, қабықтың құрғауы және саңырауқұлақтың жемісті денелерінің түзілуімен бірге жүреді. Инфекция әдетте әлсіреген немесе механикалық зақымданған ағаштарда дамиды, алайда фитопатоген еніп алғаннан кейін белсенді таралып, көшеттердің жаппай құрауына себеп болуы мүмкін. Соңғы онжылдықтарда цитоспоралы ісіктің өршуі Қытайда, Израильде және АҚШ-та бірнеше рет тіркеліп, плантациялар мен қорғаныш көшеттеріне айтарлықтай зиян келтірді [14].

Бұл аурудың таралуын бақылау дәстүрлі түрде агротехникалық тәсілдер мен фунгицидтерді қолдану арқылы жүзеге асырылады, дегенмен мұндай әдіс әрдайым тұрақты нәтиже бермей, қоршаған ортаға теріс әсерін тигізеді. Осыған байланысты биологиялық қорғау әдістеріне қызығушылық артып келеді, олардың ішінде *Trichoderma* spp. туысының саңырауқұлақтарын пайдалану ерекше орынға ие. Бірқатар зерттеулер *T. harzianum*, *T. viride* және *T. atroviride* штамдарының цитоспоралы және басқа да ағаш ісік қоздырғыштарына қарсы тиімділігі зертханалық жағдайларда да, далалық сынақтарда да дәлелденді [14].

Материалдар мен зерттеу әдістері

Үлгілерді алу және саңырауқұлақтарды оқшаулау

Ісікпен зақымданған алма ағаштарының (сорттары: Гала, Гренни Смит, Фуджи, Санрайз, Стар Кримсон, Голден Раш, Энтерпрайз, Ред Делишес, Голден Делишес, Пинк Леди, Ред Джонапринц) бұтақтары мен өркендері Алматы облысындағы алты түрлі коммерциялық бақтарынан: Алма Иссык, Мәншүк, Юнифрут, Арнау Агро, Асыл Агро, Бақдала жинақталды. Саңырауқұлақтарды бөліп алу үшін алдымен үлгілер 70 %-дық этанолмен

дезинфекцияланып, кейін некротизданған бөліктерден диаметрі 5 мм тін кесінділері алынды. Кесінділер картоп-глюкоза агары бар Петри табақшаларына орналастырылып, таза саңырауқұлақ культурасын бөліп алу үшін 27 °C температурада инкубацияланды. Колониялардың макроморфологиялық сипаттамалары өсуінің 5 және 8-і күнінде өлшеніп тіркелді.

Молекулалық идентификация

ДНҚ классикалық фенол-хлороформ әдісінің модификацияланған нұсқасы бойынша бөлінді [15,16]. Картоп-глюкозды агар (PDA) ортасында өсірілген саңырауқұлақ изоляттарының мицелийі культура бетінен алынып, 2 мл көлемдегі стерильді микроцентрифуга пробиркасына орналастырылды. ДНҚ-ның тазалығын арттыру үшін центрифугалаудан кейін 100 мкл сулы фаза алынып, 600 мкл фенол-хлороформ қоспасы қосылды.

Саңырауқұлақ изолятын идентификациялау үшін ішкі транскрибирилетін спейсер (ITS) аймағы ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') және ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') праймер жұптарын қолдану арқылы амплификацияланды. ПТР жалпы 25 мкл реакциялық көлемде жүргізілді. Құрамы: 1 мкл геномдық ДНҚ (~20 нг), 1 мкл тура және кері праймерлер (10 пМ), 12,5 мкл HS-Taq (ЖШС «БиоЛабмикс», Ресей) және 10,5 мкл нуклеазасыз су [17].

ПТР реакциясының бағдарламасына 95 °C-та 5 минуттық бастапқы денатурация, содан кейін 35 циклден тұратын денатурация (95 °C-та 15 секунд), праймерлердің байланысуы (57,5 °C-та 30 секунд), элонгация (72 °C-та 1 минут) және 72 °C-та 10 минуттық соңғы элонгация кірді. ПТР өнімдері 1,0% агарозды геле визуализацияланды.

Филогенетикалық талдау

ПТР өнімдерінің тазартылуы 2 мкл ExoSAP-IT (Applied Biosystems, Уолтем, Массачусетс, АҚШ) реагентін 5 мкл ПТР өнімімен араластыру арқылы жүргізілді. Амплификацияланған ДНҚ фрагменттері Сэнгер әдісі бойынша BigDye Terminator v3.1 (NimaGen, Неймеген, Нидерланды) жиынтығын қолдану арқылы секвенирленді. Секвенирлеу өнімдері ABI 3130xl генетикалық анализаторында (Applied Biosystems, Уолтем, Массачусетс, АҚШ) зерттелді. Осы зерттеу нәтижесінде алынған амплификацияланған генетикалық локустардың нуклеотидтік тізбектері GenBank деректер базасына депонирленді.

Алынған нуклеотидтік тізбектердің биоинформатикалық талдауы молекулалық эволюцияны статистикалық талдау және филогенетикалық ағаштарды құруға арналған MEGA 12 компьютерлік бағдарламасы көмегімен жүргізілді. Көптік туралаулар MUSCLE алгоритмі және MEGA бағдарламалық пакеті арқылы орындалды. Эволюциялық тарих пен тізбектер арасындағы дивергенция максималды ықтималдық әдісі және Тамура-Ней моделін пайдалану арқылы анықталды [23]. Филогенетикалық ағашты құру үшін BioNJ алгоритмі қолданылды. Кладалардың сенімділігі 1000 бутстрэп-репликация негізінде бағаланды.

Нәтижелер

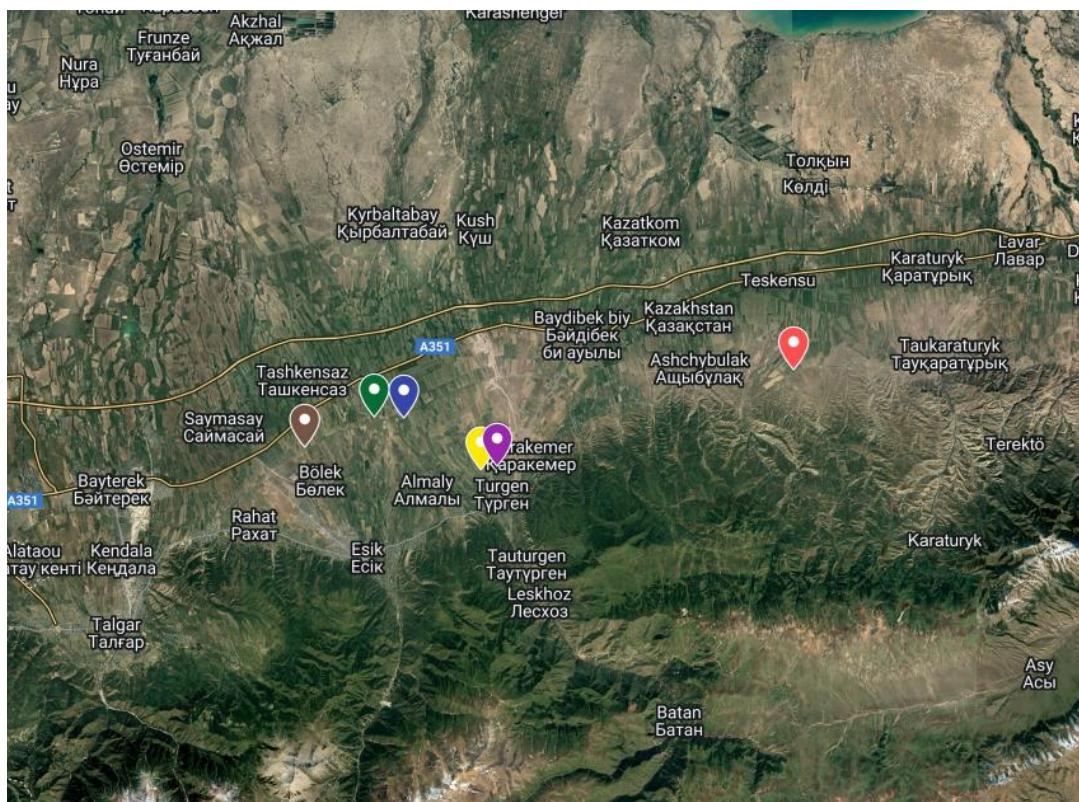
Үлгі жинақтау географиясы

Зерттеу барысында цитоспоралы ісіктің айқын белгілері бар инфицирленген алма (*Malus domestica*) бұтақтары мен өркендері Алматы облысының (Қазақстан) алты

коммерциялық бағынан жиналды. Үлгі алынған бақтарға Гала, Гренни Смит, Фуджи, Санрайз, Стар Кримсон, Голден Раш, Энтерпрайз, Ред Делишес, Голден Делишес, Пинк Леди және Ред Джонапринц сорттары кірді.

Үлгілер Алма-Иссык, Мәншүкк, Юнифрут, Арнау Агро, Асыл Агро және Бақдала шаруашылықтарынан жиналды. Олар Алматы облысының орталық және оңтүстік-шығыс бөлігінде орналасқан (Сурет 1). Карта зерттелген бақтардың аймақтағы интенсивті алма өсірудің негізгі аймақтарын – Талғар және Еңбекшіқазақ аудандарын, сондай-ақ Іле Алатауының бөктерін қамтитынын көрсетеді.

Жиналған материал қағаз қаптамаларда зертханаға жеткізіліп, 2024 жыл мен 2025 жылдың бірінші жартысында қоздырғыштарды оқшаулау және әрі қарай зерттеу үшін пайдаланылды.



Ескерту: Маркерлермен үлгі алынған шаруашылықтар белгіленген: көк – Алма-Иссык, сары – Мәншүк, жасыл – Юнифрут, қызыл – Арнау Агро, қоңыр – Асыл Агро, күлгін – Бақдала

Сурет 1. Алматы облысындағы зерттелген қарқынды алма бақтары

Саңырауқұлақтардың морфологиялық сипаттамасы, молекулалық идентификациясы және филогенетикалық талдауы

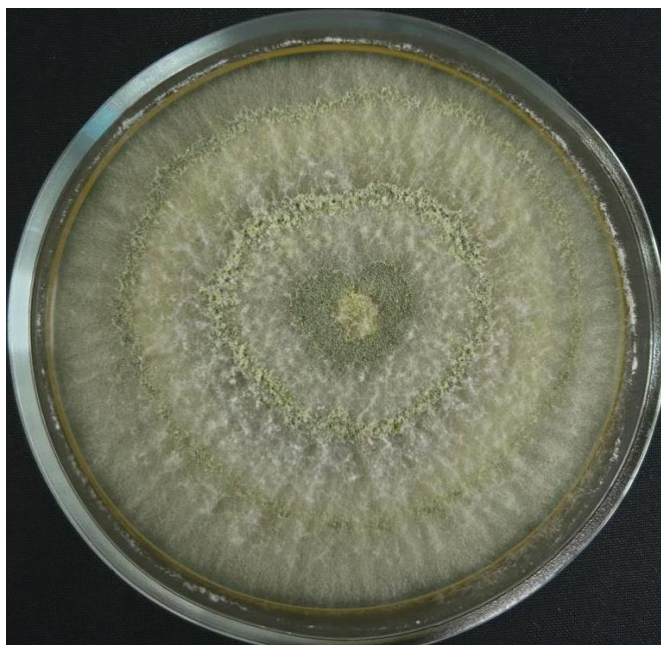
Бұған дейін цитоспоралы ісікпен зақымданған алма бұтақтарынан бөлінген *Cytospora* туысына жататын фитопатогенді саңырауқұлақтарға культуралды-морфологиялық және молекулалық зерттеу жүргізілді. Нәтижесінде *C. chrysosperma*, *C. sorbina*, *C. parasitica* және *C. pruinopsis* түрлері анықталып, түрлерге морфологиялық және молекулалық-

биоинформатикалық талдау жасалды [19]. Осы зерттеуде дәл осы штаммдар *Trichoderma harzianum* антагонистік белсенділігін бағалау үшін пайдаланылды.

Зерттеу барысында *Cytospora* туысының өкілдеріне қатысты антагонистік белсенділік көрсеткен *Trichoderma harzianum* изоляттары аталған аймақтардағы сау ағаштардың бұтақтарындағы эндофиттік микрофлора ретінде бөлініп алынды. Алғашқы кезеңде *T. harzianum* колонияларының картоп-глюкоза агарында морфологиялық ерекшеліктері зерттелді (Сурет 2).

Инкубацияның бесінші тәулігінде *T. harzianum* колониясы картоп-глюкоза агары бар Петри табақшасының бетін толық жауып, жоғары өсу қарқындылығын көрсетті. Колония *T. harzianum* саңырауқұлағына тән радиалды-зоналық құрылымға ие болды. Орталық бөлігінде жасылдау-зәйтүн түсті айқын спора түзуімен бірге мицелийдің тығыздалуы байқалды. Спора түзілуінің концентрлі сақиналары ашық және қою түсті аймақтардың кезектесе өсетінін көрсетті.

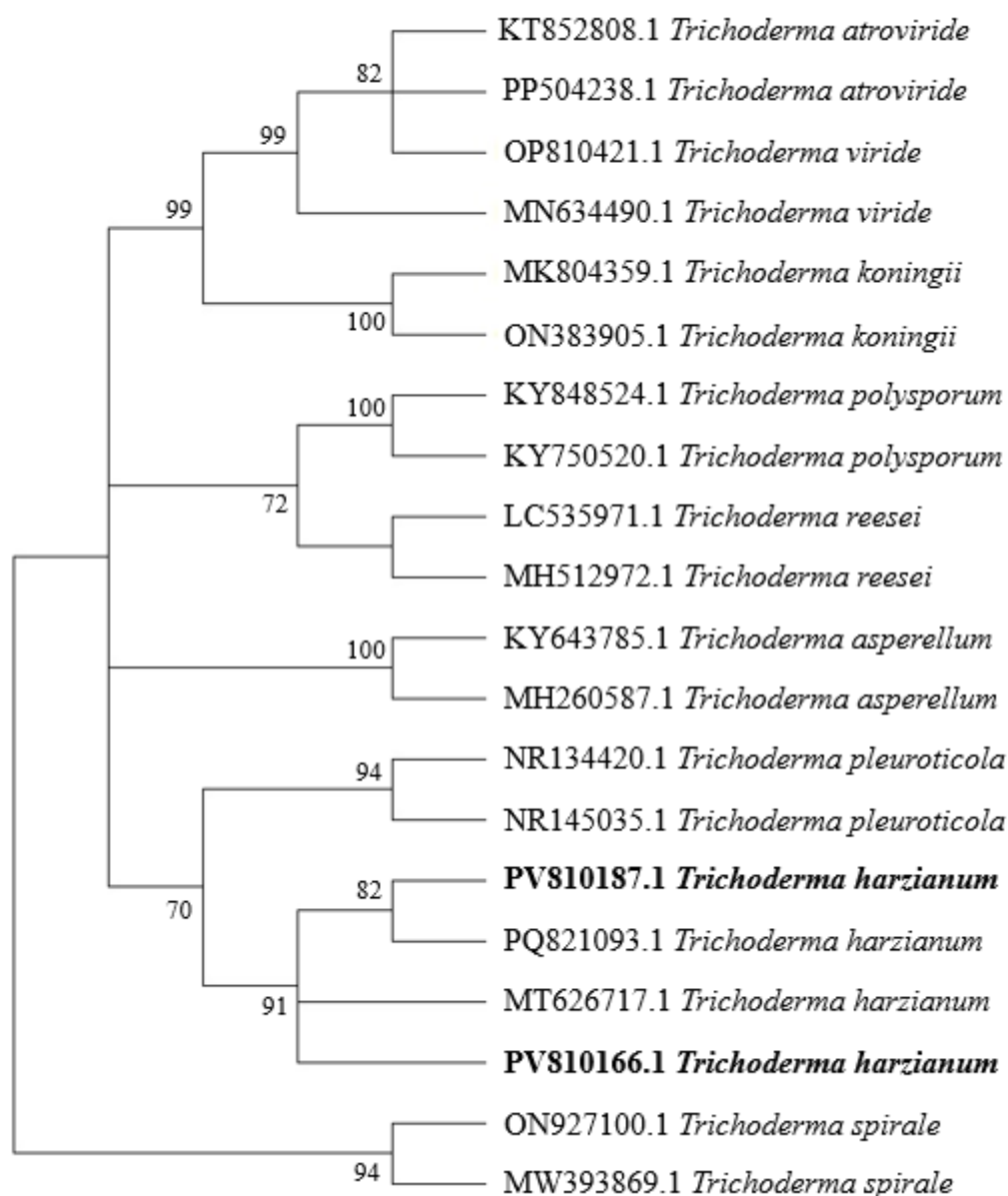
Колонияның шеті ақ түсті болып, қоректік орта бетімен белсенді таралатын мол, үлпілдек мицелиймен жабылды. Спора түзілген аймақта колония беті барқыт-ұнтақ тәрізді, ал шеттерінде – вегетативті мицелийдің белсенді өсуіне байланысты үлпілдек болды. Ауалық мицелий орташа биіктікті, бос, ортасына қарай біртіндеп тығызданды. Конидиялық құрылымдардың түзілуі негізінен орталық аймақта жүріп, түсі ақтан ашық жасылға, кейін зәйтүн -жасылға ауысты.



Сурет 2. Инкубацияның 5-тәулігінде картоп-глюкоза агарында өскен *Trichoderma harzianum* колониясының дамуы

Туыстық және түрлік идентификацияны молекулалық деңгейде растау үшін *Trichoderma* spp. туысының 2 изолятында ITS-аймақ амплификацияланды. ПТР-амплификациядан кейін алынған ұзындығы шамамен ~550 жұп негізді ампликон Сэнгер әдісімен секвенирленді. Изоляттардың секвенирлеу деректері BLASTn талдауынан кейін NCBI халық-

аралық дерекқоры, GenBank-тағы *Trichoderma harzianum* (PV810166.1, PV810187.1) тізбектерімен 100 % ұқсастық көрсетті.



Ескерту: Талдау үшін филогенетикалық ағаш BioNJ алгоритмімен және 1000 қайталау бутстрэп-тесті арқылы салынды. Осы зерттеуде алынған изоляттар қалың шрифтпен белгіленген

Сурет 3. ITS аймағы негізінде максималды ықтималдық әдісімен құрылған *Trichoderma* түрлерінің филограммасы

ITS генетикалық локусының тізбектеріне негізделіп, 1000 бутстрэп-репликацияны қолдана отырып, максималды ықтималдық әдісімен филогенетикалық ағаш құрылды (Сурет 3). Эвристикалық іздеу барысында бастапқы ағаштар максималды үнемділік

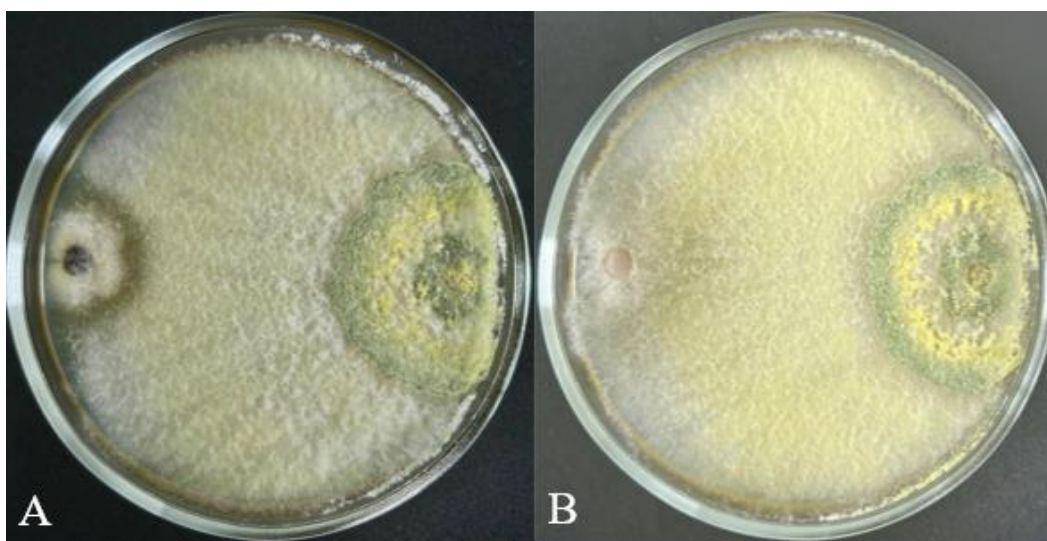
әдісі арқылы автоматты түрде алынды. Аналитикалық процедура соңғы деректер жиынтығындағы 1818 позициясы бар 20 нуклеотидтік тізбекті қамтыды. Эволюциялық талдау MEGA12 бағдарламасында 7-ге дейін параллельді есептеу ағындарын пайдалана отырып жүргізілді.

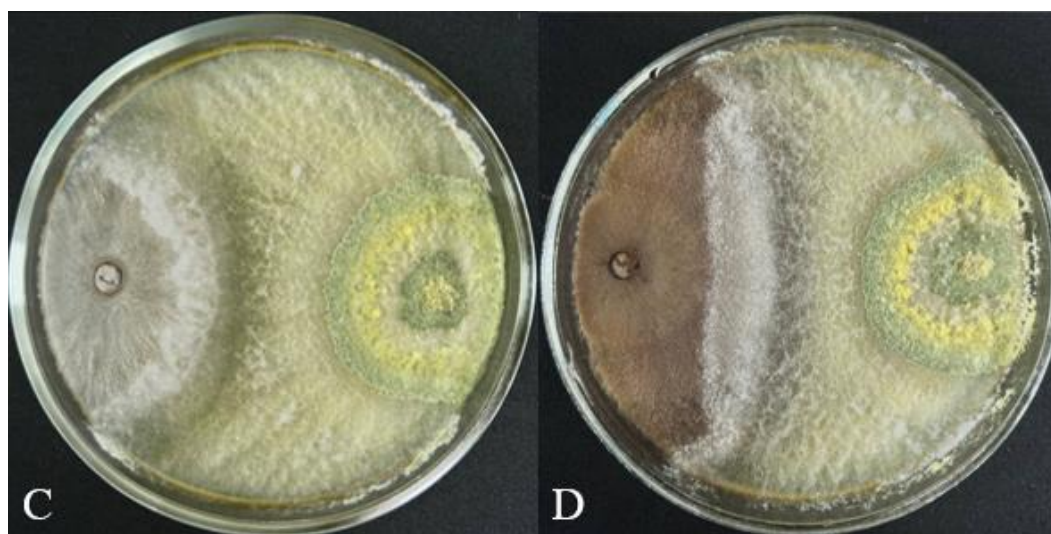
Құрылған филогенетикалық ағаш зерттелген *Trichoderma spp.* изоляттарының бірнеше кластерге бөлінгенін көрсетті, олардың әрқайсысы туыс ішіндегі таксономиялық топтарға сәйкес келеді. Айқындалып тұрған кластерге *T. atroviride* изоляттары (72-99%) кіреді, сондай-ақ *T. viride* кластері (99%) анықталды. *T. koningii* жеке, жақсы қолдау тапқан тармақты (100%) құрайды. *T. polysporum* (100%) және *T. reesei* (100%) тізбектері бөлек топталған. *T. asperellum* изоляттары жоғары қолдауға ие кластерге (100%) біріктірілген. Жеке орналасқан *T. pleuroticola* тізбектері 90% қолдаумен біртұтас тармақ түзеді. *T. harzianum* изоляттары 91% бутстрэп-қолдаумен ортақ кластерге топтасады. Дәйекті түрде *T. spirale* тобы бөлектенеді, ол екі изолятты біріктіреді (94%).

Cytospora түрлеріне қарсы *Trichoderma harzianum*-ның антагонистік белсенділігі

Trichoderma harzianum мен *Cytospora* туысының өкілдерін картоп-глюкоза агарында бірге өсірген кезде айқын антагонистік өзара әрекеттесу байқалды. Өсуінің бесінші тәулігінде *T. harzianum* мицелийі орта бетінде белсенді таралып, патоген колонияларымен тікелей байланысқа түсті. Байланыс аймағында *Cytospora* түрлерінің өсуінің тежелуі және мицелий түсінің өзгеруі тіркелді, бұл фитопатогеннің әлсіреуі мен ығыстырылуын көрсетеді (Сурет 4).

Cytospora chrysosperma түрі бар табақшада (Сурет 4А) *T. harzianum* културасы патогенді белсенді түрде тежеп, жанасу аймағында мол спора түзу қалыптастырды. *C. sorbina* түрімен жүргізілген тәжірибеде (Сурет 4В) патогеннің өсуі айтарлықтай шектелді, мицелий бақылау культураларымен салыстырғанда ашық түсті әрі сирек болды. *C. parasitica* түрімен бірге өсірілген нұсқада (Сурет 4С) патоген колониясының өсуі анық шектеліп, ал *T. harzianum* өзара әрекеттесу шекарасында тығыз споралану қалыптастырды. *C. pruinopsis*-пен бірге отырғызылған жағдайда (Сурет 4D) патогеннің өсуінің ең айқын әсері байқалды, ол мицелий түсінің қою қоңырға өзгеруімен қатар жүрді, бұл саңырауқұлақтың стресс реакциясын көрсетуі мүмкін.

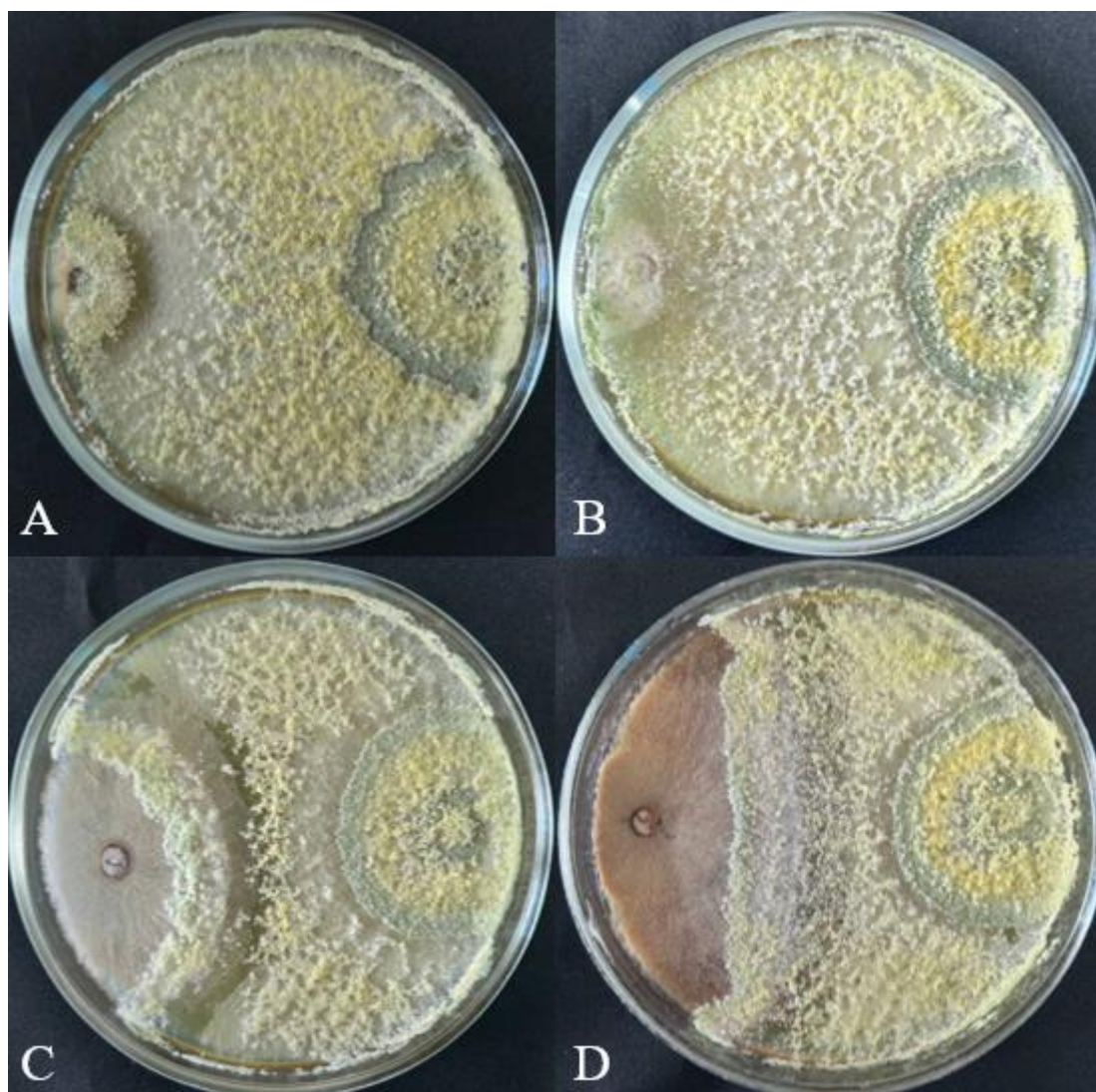




Сурет 4. Инкубацияның 5-тәулігінде *Trichoderma harzianum*-ның *Cytospora* тұқымдасының өкілдеріне қарсы антагонистік әсері **А** – *Cytospora chrysosperma*; **В** – *Cytospora sorbina*; **С** – *Cytospora parasitica*; **Д** – *Cytospora pruinopsis*

Инкубацияның сегізінші тәулігінде *Trichoderma harzianum*-ның *Cytospora* туысының өкілдеріне қарсы антагонистік белсенділігі одан әрі күшейе түсті. Барлық тәжірибе нұсқаларында *T. harzianum* антагонисінің қарқынды дамуы мен мол спора түзуі байқалып, патогендердің өсуі айтарлықтай тежеліп, олар Петри табақшаларының орталық аймақтарынан ығыстырылды (Сурет 5).

C. chrysosperma түрімен бірге отырғызылған нұсқада (Сурет 5А) патогеннің өсуі толықтай тежелді. Мицелий табақшаның шектеулі аймағын ғана алып, оны *T. harzianum*-ның белсенді таралған мицелийі толықтай жапты, бұл қарқынды спораланумен қатар жүрді. *C. sorbina* түрімен жасалған тәжірибеде (Сурет 5В) патогеннің өсуінің дерлік толық тежелуі байқалды. Оның мицелийі сирек әрі нашар дамыған күйде қалды, ал *T. harzianum* табақшаның негізгі бөлігін қамтып, жасылдау-сары түсті тығыз сақиналы споралану аймақтарын қалыптастырды. *C. parasitica* патогенімен отырғызылған жағдайда (Сурет 5С) патогеннің өсуі антагонистпен толық шектелді. Жанасу аймағында *T. harzianum*-ның белсенді споралануы айқын байқалып, ол радиалды таралып, ортаның айтарлықтай бөлігін жапты. *C. pruinopsis* патогенімен жасалған тәжірибеде (Сурет 5D) патоген мицелийінің дамуы шектеулі болып, өзгерген түсімен сипатталды, ал *T. harzianum* ортаны белсенді түрде колонизациялауды жалғастырып, біркелкі әрі мол споралану қалыптастырды.



Сурет 5. Инкубацияның 8-тәулігінде *Trichoderma harzianum*-ның *Cytospora* тұқымдасының өкілдеріне қарсы антагонистік әсері **A** – *Cytospora chrysosperma*; **B** – *Cytospora sorbina*; **C** – *Cytospora parasitica*; **D** – *Cytospora pruinopsis*

Кесте 1

***Trichoderma harzianum* және *Cytospora* spp. изоляттарының PDA ортасында бірлесіп өсіру жағдайындағы колония өсуінің динамикасы**

Патоген	5-і тәулік: колония радиусы, мм	8-і тәулік: колония радиусы, мм	Өзара әрекеттесу сипаты
<i>C. chrysosperma</i>	T.h: 40 ± 1,2 C.s: 20 ± 0,8	T.h: 56 ± 0,7 C.s: 4 ± 0,3	8-ші тәулікте патогенді толық ығыстырды
<i>C. sorbina</i>	T.h: 42 ± 0,7 C.s: 18 ± 1,1	T.h: 53 ± 0,5 C.s: 7 ± 0,4	8-ші тәулікте патогенді толық ығыстырды

<i>C. parasitica</i>	T.h: 38 ± 1,1 C.pa: 22 ± 0,9	T.h: 43 ± 1 C.pa: 17 ± 0,3	8-ші тәулікте патогенді жартылай ығыстырды
<i>C. pruinopsis</i>	T.h: 35 ± 1,3 C.pr: 25 ± 0,6	T.h: 39 ± 1,1 C.pr: 25 ± 0,4	8-ші тәулікте патогенді шамалы ығыстырды

Нәтижелер мен талқылау

Зерттеу нәтижелері *Trichoderma harzianum* эндофитінің *Cytospora* spp. патогенді саңырауқұлақтарына қарсы жоғары антагонистік белсенділігін көрсетті. Бұл деректер осы тұқымдастың өкілдері кең ауқымды фитопатогендерді ығыстыра алатынын сипаттайтын әдебиеттегі мәліметтермен сәйкес келеді. Бұған дейін *T. harzianum* мен *T. viride*-нің *Fusarium proliferatum* және *Fusarium verticillioides*-ке қарсы тиімділігі дәлелденіп, өсуінің 60–80% тежелуі және айқын микопаразиттік әсері анықталған [20]. Ұқсас нәтижелер *Alternaria alternata*, *Colletotrichum capsici*, *Rhizoctonia solani* және басқа фитопатогендерге қарсы зерттеулерде де анықталған, ол жерде қоздырғыштардың өсуі 70-85% дейін төмендеген [10,21,22].

Біздің деректеріміз *T. harzianum*-ның *Cytospora* spp. қарсы антагонизмінің негізгі механизмі микопаразитизммен, субстрат үшін бәсекелестікпен және екінші реттік метаболиттер түзілуімен байланысты екенін растайды. Бұрынғы зерттеулерде *Trichoderma* spp. белсенділігі негізінен хитиназа, целлюлаза, протеаза сияқты гидролитикалық ферменттерді, сондай-ақ 6-пентил- α -пирон мен пептаиболдарды қоса алғандағы антибиотиктерді бөлуімен анықта-латыны көрсетілген [23–25]. *T. harzianum* жоғары хитиназдық белсенділікке ие, бұл пияздың күлгін дақты ауруының қоздырғышы *Alternaria porri* саңырауқұлағымен жүргізілген тәжірибелерде расталған: патогеннің өсуінің тежелу деңгейі 73%-ға жетіп, жылыжай жағдайындағы биобақылау тиімділігі химиялық фунгицидтермен салыстырылған [8].

Ерекше назар аударатын жайт – *Trichoderma* spp. туысының жекелеген штамдарының антагонистік қасиетіндегі негізгі айырмашылықтар: тіпті бір түрдің ішінде генетикалық әртүрлілік пен экологиялық бейімделуге байланысты елеулі түрішілік вариабельділік байқалады [26, 27]. Зерттеліп отырған *T. harzianum* изоляттарына жүргізілген филогенетикалық талдау зерттеуде қолданылған штамдардың таксономиялық тиістілігін нақтылап, *Cytospora* spp. өкілдеріне қарсы биобақылауда болашақта ең тиімді болуы мүмкін бағыттарды анықтауға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде *Trichoderma harzianum* изоляттары бөлініп, олардың *Cytospora* spp. өкілдеріне қарсы жоғары антагонистік белсенділігі сипатталды. Морфологиялық талдау колониялардың түрге тән құрылысын және қарқынды спора түзу процесінде қоректік ортаны тез игеруге мүмкіндігін көрсетті.

ITS-аймағын талдау негізіндегі молекулалық идентификация зерттелген изоляттардың *Trichoderma harzianum* түріне жататынын, халықаралық NCBI деректер базасы бойынша 100% ұқсастықпен растады. Құрылған филогенетикалық ағаш зерттелген

изоляциялардың эволюциялық байланыстарын анықтап, оларды жоғары бутстрэп-қолдау мәндерімен айқын кластерлеуді көрсетті, бұл *Trichoderma* spp. тұқымдасына қатысты қазіргі таксономиялық деректермен сәйкес келеді.

C. chrysosperma, *C. sorbina*, *C. parasitica* және *C. pruinopsis* фитопатогенді саңырауқұлақтарымен бірлесіп өсіру жағдайында патогендердің өсуінің айқын тежелуі, олардың мицелийінің морфологиялық өзгерістері және антагонисттің белсенді спора түзуімен бірлесе жүрді. Ең күшті әсер инкубацияның сегізінші тәулігінде байқалды: *T. harzianum* патогендердің дамуын толықтай тоқтатып немесе айтарлықтай шектеп, тұрақты бәсекелестік артықшылық көрсетті.

Алынған нәтижелер *T. harzianum*-ның *Cytospora* spp. фитопатогенді саңырау-құлақтарына қарсы жоғары биобақылау әлеуетін дәлелдейді. Морфологиялық, куль-туральдық және молекулалық-генетикалық талдауды қамтитын кешенді тәсіл бұл изоляттарды өсімдіктердің биологиялық қорғанысының тиімді агенттері ретінде қолданудың болашағын растады.

Авторлардың қосқан үлесі

Ж.А.Ж. – мәтіннің бастапқы нұсқасын жазу; **Ж.А.Ж., Д.К.А., Н.С.К.** – эксперименттерді жүргізу; **Н.Ж., А.Ш.Е., О.А.К.** – эксперимент нәтижелерін талдау; **К.В.С.** – зерттеудің тұжырымдамасы мен дизайнын әзірлеу; **Т.Ж.А.** – жұмысты басқару, мақаланың мәтінін редакциялау және соңғы толықтау.

Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант №AP19680152).

Мүдделер қақтығысы

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Этикалық нормаларды сақтау

Авторлар орындаған бұл мақалада адамдарды немесе жануарларды объектілер ретінде пайдаланған зерттеулер жоқ.

Әдебиеттер тізімі

1. Pan M, Zhu H, Bonthond G, Tian C, Fan X. High diversity of *Cytospora* associated with canker and dieback of Rosaceae in China, with 10 new species described. *Front Plant Sci.* 2020;11:690. doi.org/10.3389/fpls.2020.00690
2. Pan M, Zhu H, Tian C, Huang M, Fan X. Assessment of *Cytospora* isolates from conifer cankers in China, with the descriptions of four new *Cytospora* species. *Front Plant Sci.* 2021;12:636460. doi.org/10.3389/fpls.2021.636460
3. Monkai J, Tibpromma S, Manowong A, Mapook A, Norphanphoun C, Hyde KD, Promputtha I. Discovery of three novel *Cytospora* species in Thailand and their antagonistic potential. *Front Microbiol.* 2022;13:882041. doi.org/10.3389/fmicb.2022.882041
4. Lin L, Pan M, Bezerra JDP, Tian C, Fan X. Re-evaluation of the fungal diversity and pathogenicity of *Cytospora* species from *Populus* in China. *Plant Dis.* 2023;107(1):83-96. doi.org/10.1094/PDIS-02-22-0260-RE

5. Norphanphoun C, Raspé O, Jeewon R, Wen TC, Hyde KD. Morphological and phylogenetic characterisation of novel *Cytospora* species associated with mangroves. *MycoKeys*. 2018;(38):93-120. doi.org/10.3897/mycokeys.38.28011
6. Bhale UN, Rajkonda JN. Compatibility of fungicides and antagonistic activity of *Trichoderma* spp against plant pathogens. *Biosci Methods*. 2015;6(3):1-9. doi.org/10.5376/bm.2015.06.0003
7. Kushwaha M, Verma AK. Antagonistic activity of *Trichoderma* spp, (a bio-control agent) against isolated and identified plant pathogens. *Int J Chem Biomed Sci*. 2014;1:1-6.
8. Abo-Elyousr KAM, Abdel-Hafez SI, Abdel-Rahim IR. Isolation of *Trichoderma* and evaluation of their antagonistic potential against *Alternaria porri*. *J Phytopathol*. 2014;162(9):567-574. doi.org/10.1111/jph.12228
9. Rajendiran R, Jegadeeshkumar D, Sureshkumar BT, Nisha T. In vitro assessment of antagonistic activity of *Trichoderma viride* against post harvest pathogens. *J Agric Technol*. 2010;6(1):31-35.
10. Yassin MT, Mostafa AAF, Al-Askar AA. In vitro antagonistic activity of *Trichoderma* spp. against fungal pathogens causing black point disease of wheat. *J Taibah Univ Sci*. 2022;16(1):57-65. doi.org/10.1080/16583655.2022.2029327
11. Kumar K, Amaresan N, Bhagat S, Madhuri K, Srivastava RC. Isolation and characterization of *Trichoderma* spp. for antagonistic activity against root rot and foliar pathogens. *Indian J Microbiol*. 2012;52(2):137-144. doi.org/10.1007/s12088-011-0205-3
12. Larran S, Santamarina Siurana MP, Roselló Caselles J, Simón MR, Perelló A. In vitro antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* against *Fusarium sudanense* causing seedling blight and seed rot on wheat. *ACS Omega*. 2020;5(36):23276-23283. doi.org/10.1021/acsomega.0c03090
13. Castro GS, Sousa TF, da Silva GF, Pedroso RCN, Menezes KS, et al. Characterization of peptaibols produced by a marine strain of the fungus *Trichoderma endophyticum* via mass spectrometry, genome mining and phylogeny-based prediction. *Metabolites*. 2023;13(2):221. doi.org/10.3390/metabo13020221
14. Yi HW, Chi YJ. Biocontrol of *Cytospora* canker of poplar in north-east China with *Trichoderma longibrachiatum*. *For Pathol*. 2010;40(4):299-307. doi.org/10.1111/j.1439-0329.2010.00704.x
15. Smagulova A, Uakhit R, Kiyan V. First record of *Alternaria alternata* causing necrosis of *Thuja* (*Thuja occidentalis*) in Kazakhstan. *Plant Dis*. 2022;106(11):2951-2956. doi.org/10.1094/PDIS-11-21-2523-PDN
16. Chomczynski P, Sacchi N. Single-step method of RNA isolation by acid guanidinium thiocyanate-phenol-chloroform extraction. *Anal Biochem*. 1987;162(1):156-159. doi.org/10.1006/abio.1987.9999
17. White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor JW. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ, editors. *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. Cambridge, MA: Academic Press; 1990;18:315-322.
18. Tamura K, Stecher G, Kumar S. MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. *Mol Biol Evol*. 2021;38(7):3022-3027. doi.org/10.1093/molbev/msab120
19. Tulegenova Z, Amanbayeva U, Shalabayeva AM, et al. Identification and pathogenicity of causal agents of apple canker disease in Kazakhstan. *Horticulturae*. 2025;11(1):45. doi.org/10.3390/horticulturae11010045
20. Yassin MT, Mostafa AAF, Al-Askar AA, Sayed SRM, Rady AM. Antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma viride* strains against some fusarial pathogens causing stalk rot disease of maize, in vitro. *J King Saud Univ Sci*. 2021;33(3):101363. doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101363

21. Rahman MA, Razvy MA, Alam MF. Antagonistic activities of *Trichoderma* strains against chili anthracnose pathogen. *Int J Microbiol Mycol.* 2013;1(1):7-22.
22. Abbas A, Jiang D, Fu Y. *Trichoderma* spp. as antagonist of *Rhizoctonia solani*. *J Plant Pathol Microbiol.* 2017;8:402. doi.org/10.4172/2157-7471.1000402.
23. Joshi BB, Bhatt RP, Bahukhandi D. Antagonistic and plant growth activity of *Trichoderma* isolates of Western Himalayas. *J Environ Biol.* 2010;31(6):921-928.
24. Li Y, Sun R, Yu J, Saravanakumar K, Chen J. Antagonistic and biocontrol potential of *Trichoderma asperellum* ZJSX5003 against the maize stalk rot pathogen *Fusarium graminearum*. *Indian J Microbiol.* 2016;56(3):318-327. doi.org/10.1007/s12088-016-0581-9
25. Singh V, Keswani C, Ray S, et al. Isolation and screening of high salinity tolerant *Trichoderma* spp. with plant growth property and antagonistic activity against various soilborne phytopathogens. *Arch Phytopathol Plant Protect.* 2019. doi.org/10.1080/03235408.2019.1648917
26. Jambhulkar PP, Singh B, Raja M, et al. Genetic diversity and antagonistic properties of *Trichoderma* strains from the crop rhizospheres in southern Rajasthan, India. *Sci Rep.* 2024;14(1):8610. doi.org/10.1038/s41598-024-58302-5
27. Anees M, Tronsmo A, Edel-Hermann V, Hjeljord LG, Héraud C, Steinberg C. Characterization of field isolates of *Trichoderma* antagonistic against *Rhizoctonia solani*. *Fungal Biol.* 2010;114(9):691-701. doi.org/10.1016/j.funbio.2010.05.007

Антагонистическая активность *Trichoderma harzianum* в отношении грибов рода *Cytospora* и филогенетический анализ изолятов

А.Ж. Жаксылыков², К.А. Дюсембаев^{1,2}, С.К. Наекова^{1,2}, Ж. Нурбекова¹, Ш.Е. Арыстанова¹, А.К. Оспанова³, В.С. Киян^{1,2}, Ж.А. Тулегенова^{*1,2}

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Национальный центр биотехнологии, Астана, Казахстан

³Павлодарский педагогический университет имени Алкея Маргулана, Павлодар, Казахстан

Аннотация. В данном исследовании была проведена оценка антагонистической активности *Trichoderma harzianum* по отношению к фитопатогенным грибам рода *Cytospora*, которые вызывают некроз и усыхание плодовых и лесных древесных культур. Морфологическая характеристика культур *T. harzianum* показала характерное строение и интенсивное спороношение мицелия, обеспечивавшее быстрое освоение питательной среды. При совместном культивировании выявлено выраженное угнетение роста патогенов *C. chrysosperma*, *C. sorbina*, *C. parasitica*, *C. pruinopsis*, которое проявлялось изменением окраски мицелия, ограничением развития колоний патогенов и их вытеснением из центральных зон чашек Петри. На восьмые сутки инкубации рост фитопатогенных грибов рода *Cytospora* подавлялся антагонистом *Trichoderma harzianum*, сопровождаясь активным спороношением. Молекулярная идентификация на основе анализа ITS-региона подтвердила принадлежность выделенных изолятов к виду *T. harzianum* (100% сходство с данными GenBank). Построенное филогенетическое дерево показало чёткую кластеризацию изолятов в составе таксономической группы *T. harzianum* с высокой бутстрэп-поддержкой. Полученные результаты подтверждают, что использование *T. harzianum* в качестве эффективного агента биологической защиты растений против грибов рода *Cytospora*

перспективно и подчёркивают важность комплексного подхода, включающего морфологический и молекулярно-генетический анализ при исследовании антагонистических свойств.

Ключевые слова: *Trichoderma harzianum*, *Cytospora* spp., антагонистическая активность, морфология, филогенетический анализ, биоконтроль

Antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* against *Cytospora* fungi and phylogenetic analysis of isolates

A.Zh. Zhaxylykov², K.A. Dyussebayev^{1,2}, S.K. Nayekova^{1,2}, Zh. Nurbekova¹, Sh.E. Arystanova¹, A.K. Ospanova³, V.S. Kiyan^{1,2}, Z.A. Tulegenova^{*1,2}

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²National center for biotechnology, Astana, Kazakhstan

³Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan, Pavlodar, Kazakhstan

Abstract. This study evaluated the antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* against phytopathogenic fungi of the genus *Cytospora*, which cause necrosis and dieback in fruit and forest tree species. Morphological characterization of *T. harzianum* cultures revealed typical structures and intensive sporulation of the mycelium, ensuring rapid colonization of the nutrient medium. During dual culture, pronounced inhibition of the pathogens *C. chrysosperma*, *C. sorbina*, *C. parasitica*, and *C. pruinopsis* was observed, manifested by changes in mycelial pigmentation, restricted colony development, and displacement of the pathogens from the central zones of Petri dishes. By the eighth day of incubation, the growth of *Cytospora* phytopathogens was suppressed by the antagonist *T. harzianum*, accompanied by active sporulation. Molecular identification based on ITS-region analysis confirmed that the isolates belonged to *T. harzianum* (100% identity with GenBank data). The constructed phylogenetic tree showed clear clustering of the isolates within the *T. harzianum* taxonomic group with high bootstrap support. The results confirm that *T. harzianum* is a promising biological control agent against *Cytospora* fungi and highlight the importance of an integrated approach combining morphological and molecular-genetic analyses in studies of antagonistic properties.

Keywords: *Trichoderma harzianum*, *Cytospora* spp., antagonistic activity, morphology, phylogenetic analysis, biocontrol

Авторлар туралы мәліметтер:

Жаксылыков Алихан Жомартович – жаратылыстану ғылымдарының бакалавры, Ұлттық биотехнология орталығының биоалуантүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Қорғалжын тас жолы, 13/5, 010000, Астана, Қазақстан.

Дюсембаев Казбек Амзұлы – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, биотехнология және микробиология кафедрасының доцент м.а., Қажымұқан көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан; Ұлттық биотехнология орталығының биоалуантүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының ғылыми қызметкері, Қорғалжын тас жолы, 13/5, 010000, Астана, Қазақстан.

Наекова Салтанат Кубеевна – биология магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, биотехнология және микробиология кафедрасының аға оқытушысы, Қажымұқан

көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан; Ұлттық биотехнология орталығының биоалуантүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының ғылыми қызметкері, Қорғалжын тас жолы, 13/5, 010000, Астана, Қазақстан.

Нұрбекова Жадырасын Ақбергенқызы – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, биотехнология және микробиология кафедрасының қауымд. профессор м.а., Қажымұқан көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Арыстанова Шолпан Есқуатовна – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, биотехнология және микробиология кафедрасының ғылым докторы, Қажымұқан көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Оспанова Айнагуль Кенжешовна – биология ғылымдарының кандидаты, Әлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университетінің профессоры, Сәтбаев көшесі 123, 140000, Павлодар, Қазақстан.

Киян Владимир Сергеевич – PhD, қауымд. профессор, Ұлттық биотехнология орталығының биоалуантүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының жетекшісі, Қорғалжын тас жолы, 13/5, 010000, Астана, Қазақстан.

Түлегенова Жанар Асанбаевна – хат-хабар авторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, биотехнология және микробиология кафедрасының доцент м.а., Қажымұқан көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан; Ұлттық биотехнология орталығының биоалуантүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының аға ғылыми қызметкері, Қорғалжын тас жолы, 13/5, 010000, Астана, Қазақстан.

Сведения об авторах:

Жаксылыков Алихан Жомартович – бакалавр естественных наук, младший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов Национального центра биотехнологии, шоссе Коргалжын, 13/5, 010000, Астана, Казахстан.

Дюсембаев Казбек Амзеулы – PhD, и.о. доцента кафедры биотехнологии и микробиологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан; научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов Национального центра биотехнологии, шоссе Коргалжын, 13/5, 010000, Астана, Казахстан.

Наекова Салтанат Кубеевна – магистр биологии, старший преподаватель кафедры биотехнологии и микробиологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан; научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов Национального центра биотехнологии, шоссе Коргалжын, 13/5, 010000, Астана, Казахстан.

Нурбекова Жадырасын Ақбергенқызы – и.о. ассоциированного профессора кафедры биотехнологии и микробиологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Арыстанова Шолпан Есқуатовна – доктор наук, кафедра биотехнологии и микробиологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан.

Оспанова Айнагуль Кенжешовна – кандидат биологических наук, профессор Павлодарского педагогического университета им. Алкея Маргулана, ул. Сатпаева, 123, 140000, Павлодар, Казахстан.

Киян Владимир Сергеевич – PhD, ассоциированный профессор, заведующий лабораторией биоразнообразия и генетических ресурсов Национального центра биотехнологии, шоссе Коргалжын, 13/5, 010000, Астана, Казахстан.

Тулегенова Жанар Асанбаевна – автор-корреспондент, и.о. доцента кафедры биотехнологии и микробиологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан; старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов Национального центра биотехнологии, шоссе Коргалжын, 13/5, 010000, Астана, Казахстан.

Information about the authors:

Zhaxylykov Alikhan Zhomartovich – Bachelor of Natural Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology, Korgalzhyn Highway 13/5, 010000, Astana, Kazakhstan.

Duyssembayev Kazbek Amzeuly – PhD, Associate Professor, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street 13, 010008, Astana, Kazakhstan; Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology, Korgalzhyn Highway 13/5, 010000, Astana, Kazakhstan.

Nayekova Saltanat Kubeevna – Master of Biology, Senior Lecturer, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street 13, 010008, Astana, Kazakhstan; Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology, Korgalzhyn Highway 13/5, 010000, Astana, Kazakhstan.

Nurbekova Zhadyrasyn Akbergenkyzy – Associate Professor, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street 13, 010008, Astana, Kazakhstan.

Arystanova Sholpan Eskuatovna – Doctor of Science, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street 13, 010008, Astana, Kazakhstan.

Ospanova Ainagul Kenzheshovna – Candidate of Biological Sciences, Professor, Alkey Margulan Pavlodar Pedagogical University, Satpaev Street 123, 140000, Pavlodar, Kazakhstan.

Kiyan Vladimir Sergeevich – PhD, Associate Professor, Head of the Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Biotechnology Center, Korgalzhyn Highway 13/5, 010000, Astana, Kazakhstan.

Tulegenova Zhanar Asanbayevna – Corresponding Author, Associate Professor, Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Street 13, 010008, Astana, Kazakhstan; Senior Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology, Korgalzhyn Highway 13/5, 010000, Astana, Kazakhstan.



МРНТИ 34.31.29

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-103-122>

Научная статья

Флористические особенности озер Костанайской области

Г.Ж. Султангазина*¹, А.Н. Куприянов², О.А. Куприянов², С.Б. Куанышбаев¹,
А.У. Ыскак¹, В.Н. Чашков¹

¹Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтурсынулы, Костанай, Казахстан

²Кузбасский ботанический сад, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Российская Федерация

Аннотация. В результате исследования получены новые фундаментальные знания о флористическом составе берегов 12 естественных озер степной зоны Костанайской области (8 пресных и 4 соленых в разной степени). Изучение особенностей флористического состава озер проводилось в трех зонах (литоральная, супралиторальная и озерная терраса). Общий флористический список берегов исследованных озер составляет 146 видов, относящихся к 100 родам и 37 семействам высших сосудистых растений. Литоральная зона представлена 29 видами. Наибольшей активностью в пресноводных озерах обладает *Phragmites australis*, который на большинстве пресноводных озер образует широкую полосу до 100 (150) м. Видовой состав представлен в основном гидрофитами и гидрогигрофитами. Супралиторальная зона представлена 56 видами. Наибольшим проективным покрытием (35,62%), встречаемостью (62%) и активностью (46,99) обладает *Phragmites australis*. В супралиторальной зоне засоленных озер наибольшей активностью обладает *Salicornia perennans* (11,21). Флора озерных террас насчитывает 94 вида. Наибольшим проективным покрытием (13,64%) и активностью (22,16%) обладает *Calamagrostis epigeios*. Флора берегов озер характеризуется большим количеством сорных растений (25 видов), что составляет 17% от общего числа видов. Среди сорных видов широко распространен и активен адвентивный и инвазионный вид *Hordeum jubatum*, произрастающий в большей части Северной Америки и на севере Восточной Сибири.

Ключевые слова: озера Казахстана, пресноводные и засоленные озера, флористическое разнообразие, литоральная зона, супралиторальная зона, озерная терраса

Введение

Водная безопасность страны является одним из факторов обеспечения национальной безопасности, в том числе продовольственной и экологической. Под водной безопа-

Поступила: 23.07.2025. Одобрена: 30.09.2025. Доступна онлайн: 30.09.2025.

*Автор-корреспондент: gul_sultan@mail.ru

сностью понимается защищенность жизненно важных интересов общества (здоровье людей, окружающая среда, производство) от гидрологических угроз [1].

Наряду с исследованиями настоящего и будущего водообеспеченности республики (речной сток, подземные и ледниковые воды, водохранилища), существует недостаток полной информации о состоянии озер Казахстана [2].

Суммарная площадь поверхности озер Северного Казахстана более 19 тыс. км², здесь насчитывается более 11 тыс. пресных озер и 2,5 тыс. соленых озер с площадью зеркала от 0.01 до 50 км² и больше [3,4]. В Северном Казахстане многие озера образовались в ложбинах древних рек. На Тургайском плато образование небольших котловин и степных блюдеч связано с суффозией и просадкой, а местами с древним термокарстом мерзлых толщ. Такие озера поддерживаются снеговым и грунтовым питанием. Обычно эти озера располагаются цепочкой и имеют продолговатую форму. Одна из таких «цепочек» занимает древнюю ложбину реки Тургай. Вся эта длинная цепь с пресными и солеными водоемами, с берегами, утопающими в зарослях тростника или опущенными солончаками, тянется более чем на 500 км [2]. N. Querry и K. Harper (2018), изучавшие зарастание берегов озер Канады пришли к выводу, что богатство травянистой растительности побережья озер тесно связано с высоким структурным разнообразием в прибрежных зонах [5-7].

Водные и прибрежно-водные растения являются важным компонентом природных экосистем, имеют большое экологическое и хозяйственное значение.

Актуальность исследований связана как с фундаментальной задачей – изучением флористического и ценотического разнообразия водных фитоценозов, так и с прикладной – оценкой состояния водных экосистем по экологическим характеристикам высших водных растений. Последнее дает возможность зафиксировать начало изменений в окружающей среде, изучить развитие этих изменений во времени и пространстве.

Флора макрофитов не является постоянной в пространственно-временном континууме, а зависит от комплекса действующих факторов как природных, так и антропогенных. Примером действия современных возмущающих факторов являются условия урбанизированной среды, в пределах которых региональная флора трансформируется в адаптированный к данному режиму вариант [8-10].

Усиление антропогенных и техногенных факторов, глобальное потепление ведет к изменению флористического состава водных и прибрежно-водных растений, что вызывает необходимость инвентаризации флористического состава. Новизна проводимых исследований связана с крайне недостаточными сведениями по зарастанию прибрежно-береговых зон озер, располагаемых в Костанайской области, подверженных антропогенным факторам, а также изменением климата.

Целью проводимых исследований являлось изучение флористического состава естественных озер степной зоны, находящихся на территории Костанайской области.

Материалы и методы исследования

В методическом плане чрезвычайно важно определить границы водоема, что очень важно для субаридной зоны Казахстана с чрезвычайно изменяющейся береговой

границей (высокий уровень воды в весеннее время и обмеление к осени). Поэтому при анализе флористический фрагмент флоры водоемов не может пониматься узко, выделяя только гидрофильный элемент, не включая в него перечень прибрежно-водных растений [11-15]. Изучение особенностей флористического состава озер проводилось в трех зонах. Литоральная зона определялась от уреза воды до нижней границы произрастания высших цветковых растений (Рисунок 1, I). Обычно исследования проводились от уреза воды до глубины 1,5-2,0 м. Супралиторальная зона – участок берега, который периодически затопляется во время паводков и освобождается к осени (Рисунок 1, II). Здесь формируется так называемый эфемеретум – совокупность быстро развивающихся видов на иловатых затопляемо-осушаемых прибрежных участках [16, 17]. По мнению R.J Naiman с сотр. (1988, 1997), прибрежные растительные сообщества дают представление о разнообразии видового богатства в различных пространственных и временных масштабах, поскольку они поддерживают сложные участки среды обитания, которые создаются и разрушаются в результате гидрологических нарушений, что приводит к ежегодному перераспределению видов [18,19].

Озерная терраса – территория, как правило, не затопляемая в весеннее время и являющаяся переходной зоной от пойменной части к коренной растительности. Во флористическом отношении она несет элементы супралиторальной зоны и коренной растительности (Рисунок 1, III).

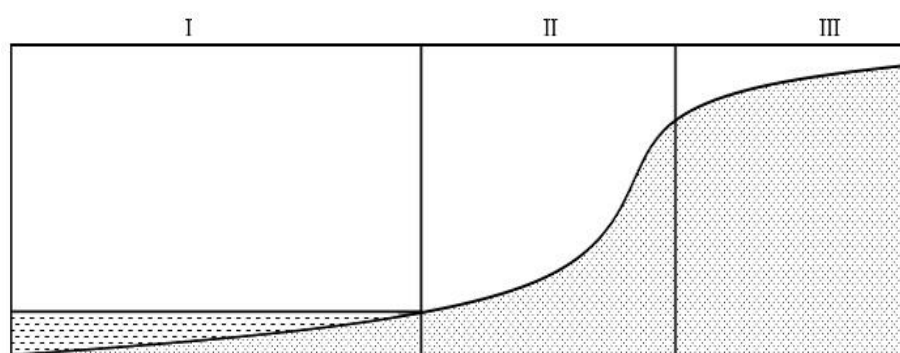


Рисунок 1. I – литоральная зона, II – супралиторальная зона, III – озерная терраса

По степени зарастания литоральной зоны выделены следующие группы в зависимости от степени зарастания [20]: I – не зарастающие (менее 1%); II – слабо зарастающие (1–10%); III – умеренно зарастающие (11–25%); IV – сильно зарастающие (26–50%); V – очень сильно зарастающие (51–95%); VI – полностью заросшие (100%).

Всего обследовано 12 озер Костанайской области (Рисунок 2–5; Таблица 1).

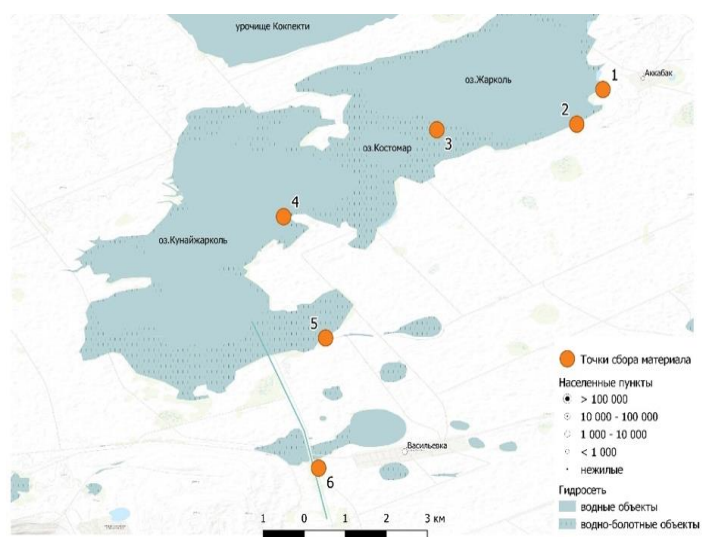


Рисунок 2. 1-5 – система озера Жарколь; 6 – озеро близ с. Васильевка

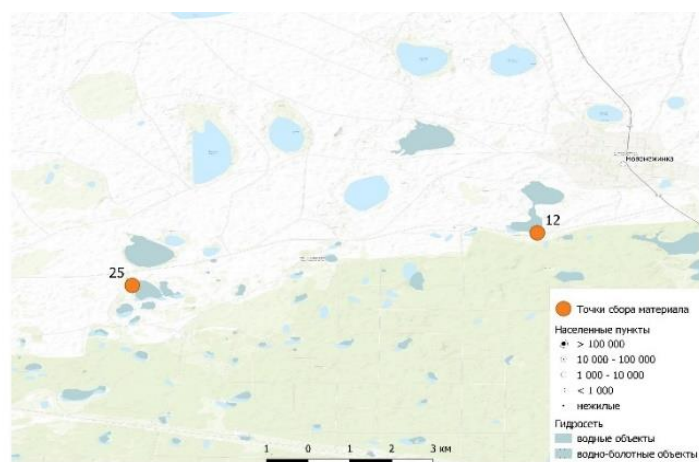


Рисунок 3. 12 – безымянное соленое озеро; 25 – безымянное озеро

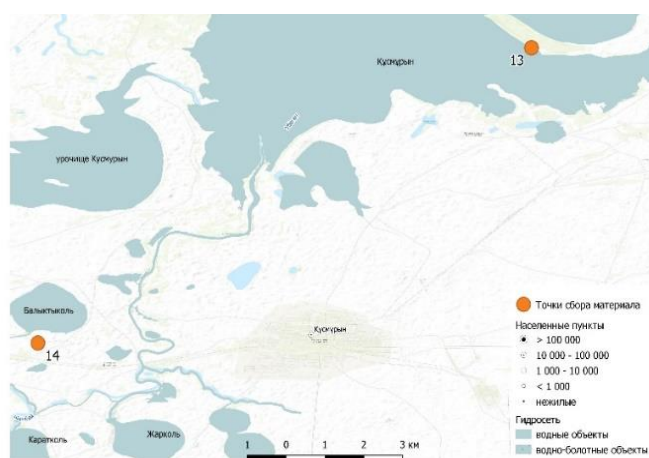


Рисунок 4. 13 – озеро Кушмурун; 14 – озеро Балыктыколь

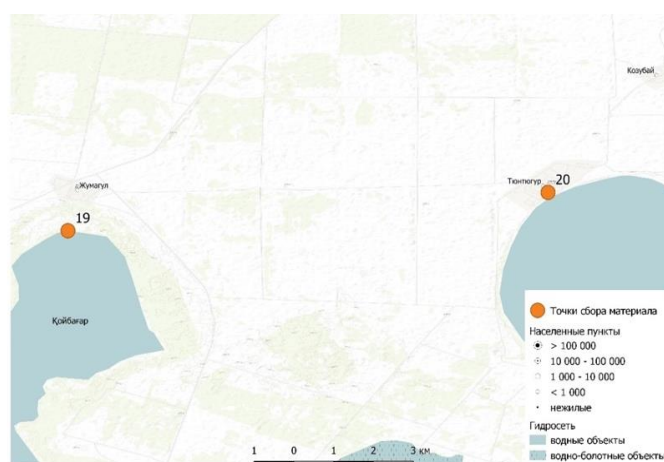


Рисунок 5. 19 – озеро Койбагар; 20 – озеро Тюнтюгур

Таблица 1

Точки проведения флористических описаний

№	с.ш.	в.д.	Экотоп	Степень зарастания
№1. Оз. Жарколь 4	53.19450	63.271410	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№2. Оз. Жарколь 3	53.183260	63.261910	пологий берег, покрытый песком	III
№3. Оз. Жарколь 2	53.181440	63.211113	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№4. Оз. Жарколь 1	53.153290	63.155460	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№ 5. Большое озеро близ с. Васильевка	53.113970	63.170730	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№ 6. оз. Кашиливское близ с. Васильевка	53.071800	63.168190	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№ 12. Безымянное озеро	52.507220	64.004620	Засоленное озеро	II
№ 13. Оз. Кушмурун	52.5531990	64.691860	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI

№ 14. Оз. Балыктыколь (соленое оз.)	52.448790	64.51160	Засоленное озеро	I
№ 19. Оз. Койбагар (окр. пос. Жумагул)	52.720890	65.624820	Пологий берег, широкая литоральная зона	VI
№ 20. Оз. Тюнтюгур (окр. с. Тюнтюгур)	52.721910	65.803770	Засоленное озеро	I
№ 25. Безымянное озеро, близ с. Новонежинка	52.488120	63.861830	Слабо засоленное озеро, широкая литоральная зона	VI

Фактический материал собран в ходе рекогносцировочного гидробиотанического обследования озер Костанайской области в июле – августе 2025 года. Геоботанические описания проводились в каждой из трех зон. Площадь пробной площадки составляла 100 м². Определялось общее и частное проективное покрытие (%) [21]. Качественный учет растений проводился согласно принятых методик [22, 23]. Определялось количество видов (шт.), встречаемость, %, парциальное проективное покрытие, %. При анализе эколого-ценотических групп выделялись сорные и адвентивные растения. В прикладной ботанике термин «сорные растения» приложимо к сельскому хозяйству. В.В. Никитин (1983) считал, что сорные растения – это не культивируемые человеком, но исторически приспособившиеся к условиям возделывания культурных растений, растущие вместе с ними и наносящие им вред [24]. Т.Н. Ульянова (2005) считает, что сорным растение делает его экология вторичного местообитания и отношение человека к нему на определенном отрезке времени [25]. В нашем исследовании условно сорными растениями мы считаем те виды, которые не относятся ни к водным растениям, ни к прибрежным или лугово-степным растительным сообществам.

Для суммарной оценки ценотического положения вида используется комплексный показатель активности вида (%), который показывает меру жизненного преуспевания вида на данной территории, одно из выражений «веса вида» в данной флоре [26]. Расчет активности видов выполняется в системе IBIS [27] по формуле:

$$Act = \sqrt{\frac{C \times 100\%}{N} \times \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N}} = 10 \times \frac{\sqrt{C \times A_{\Sigma}}}{N} \% \quad (1),$$

где Act – расчетная активность таксона для мониторинговой площади в процентах (0÷100%);

N – число учетных площадок (элементарных метровых проб);

C – постоянство таксона – абсолютное число учетных площадок, где зарегистрирован таксон;

A_i – проективное покрытие таксона на i -ой учетной площадке;

A_{Σ} – сумма проективных покрытий таксона на всех учетных площадках.

Результаты

Литоральная зона

Литоральная зона представлена 29 видами, относящимися к макрофитам (Таблица 2, Рисунок 6).

Таблица 2

Флористические особенности наиболее активных видов литоральной фракции флоры берегов озер (12 озер)

Виды растений	Общее проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Активность видов, %
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	45,23	54	49,42
<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	1,50	38	7,55
<i>Triglochin palustre</i> L.	1,00	38	6,16
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	4,65	8	6,10
<i>Bolboschoenus planiculmis</i> (Fr. Schmidt) Egor.	1,92	15	5,37
<i>Typha latifolia</i> L.	1,58	31	6,99
<i>Persicaria amphibia</i> (L.) S. F. Gray.	0,77	15	3,40
<i>Batrachium rionii</i> (Lagger.) Nym.	0,50	23	3,39
<i>Lemna minor</i> L.	0,65	23	3,88
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	0,62	15	3,04
<i>Lemna trisulca</i> L.	0,65	15	3,13
<i>Potamogeton natans</i> L.	0,46	15	2,63
<i>Salix viminalis</i> L.	0,46	15	2,63
<i>Schoenoplectus lacustris</i> (L.) Palla	0,46	15	2,63
<i>Carex riparia</i> Curtis.	0,77	8	2,48
<i>Potamogeton lucens</i> L.	0,50	15	2,74



а)

б)

Рисунок 6. Озеро Жарколь: **а)** – литоральная зона (заросли *Batrachium rionii* (Laggen.) Nym.); **б)** – супралиторальная зона (заросли *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)

Наибольшей активностью пресноводных озер обладает *Phragmites australis*, который на большинстве пресноводных озер образует широкую полосу до 100 (150) м. В среднем его встречаемость составила 54%, проективное покрытие – 45,2%, активность – 49,4%. Далее с большим отставанием располагаются *Potamogeton perfoliatus* – активность 7,55%, *Typha latifolia* – активность 6,99%, *Triglochin palustre* и *Hydrocharis morsus-ranae* – активность 6,16 и 6,10% соответственно. Видовой состав представлен в основном гидрофитами (*Batrachium rionii*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Lemna minor*, *L. trisulca*, *Potamogeton lucens*, *P. natans*, *P. perfoliatus*) и гидрогигрофитами, среди которых наибольшее участие принимают *Agrostis stolonifera*, *Bolboschoenus planiculmis*, *Phragmites australis*, *Triglochin palustre*, *Typha latifolia* и др.).

Супралиторальная зона

Супралиторальная зона представлена 56 видами (Таблица 3, Рисунок 7, 8).

Таблица 3

Флористические особенности наиболее активных видов супралиторальной зоны флоры берегов озер (12 озер)

Виды растений	Общее проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Активность видов, %
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	35,62	62	46,99
<i>Salicornia perennans</i> Willd.	3,31	38	11,21
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	5,00	23	10,72

<i>Puccinellia distans</i> (Jacq.) Parl.	2,58	23	7,70
<i>Suaeda acuminata</i> (C.A.Mey.) Moq.	1,54	23	5,95
<i>Bolboschoenus planiculmis</i> (Fr. Schmidt) Egor.	1,12	31	5,88
<i>Artemisia abrotanum</i> L.	1,23	23	5,32
<i>Bidens tripartita</i> L.	1,08	23	4,98
<i>Hordeum jubatum</i> L.	1,08	23	4,98
<i>Tripolium pannonicum</i> (Jacq.) Dobrocz.	0,85	23	4,41
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	1,15	15	4,16
<i>Atriplex cana</i> C. A. Mey.	1,00	15	3,87
<i>Suaeda corniculata</i> (C. A. Mey.) Bunge	1,00	15	3,87
<i>Puccinellia tenuiflora</i> (Griseb.) Scribn. et Merr.	0,54	15	2,84
<i>Artemisia dracunculus</i> L.	0,46	15	2,63
<i>Oenanthe aquatica</i> (L.) Poir.	0,46	15	2,63
<i>Saussurea amara</i> (L.) DC.	0,46	15	2,63
<i>Hordeum brevisubulatum</i> (Trin.) Link.	0,77	8	2,48
<i>Typha angustifolia</i> L.	0,77	8	2,48
<i>Alisma lanceolatum</i> With.	0,31	15	2,15
<i>Cirsium setosum</i> (Willd.) Bess.	0,31	15	2,15
<i>Plantago major</i> L.	0,31	15	2,15



а)



б)

Рисунок 7. Озеро Жарколь: **а)** – супралиторальная зона (на переднем плане *Lepidium latifolium* L.); **б)** – редкий вид *Rhaponticum serratuloides* (Georgi) Bobr.

В супралиторальной зоне наибольшим проективным покрытием (35,62 %), встречаемостью (62%) и активностью (46,99) обладает *Phragmites australis*, который в этой зоне проявляет свои мезогигрофитные свойства. Далее на супралиторальной зоне засоленных озер наибольшей активностью обладает *Salicornia perennans* (11,21), в сублиторальной зоне пресных озер наибольшей активностью обладает *Calamagrostis epigeios* (10,72%). В супралиторальной зоне пресных озер высокой активностью обладают *Bolboschoenus planiculmis* (5,88 %), *Artemisia abrotanum* (5,32%), *Bidens tripartite* (4,98%), *Tripolium pannonicum* (4,41%), *Elytrigia repens* (4,16%). В супралиторальной зоне засоленных озер высокой активностью обладают *Puccinellia distans* (7,70), *P. tenuiflora* (2,84), *Atriplex cana* и *Suaeda corniculata* (по 3,87).



а)

б)

Рисунок 8. Засоленное озеро близ с. Кушмурун: а) – литоральная зона; б) – супралиторальная зона

Флора озерных террас насчитывает 94 вида (Таблица 4, Рисунок 9).

Таблица 4

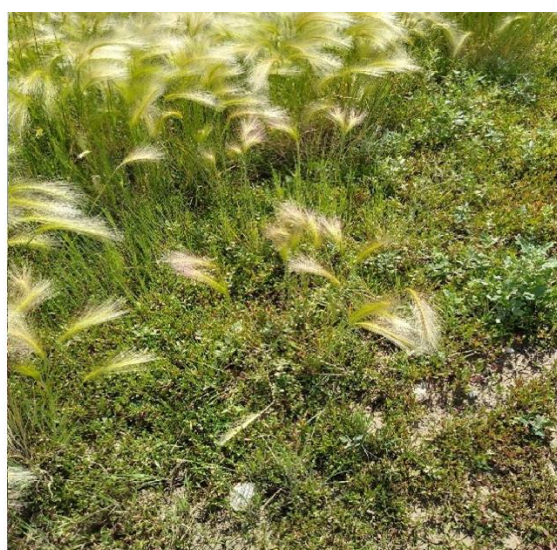
Флористические особенности наиболее активных видов озерных террас

Виды растений	Общее проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Активность видов, %
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	13,64	36	22,16
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	10,91	36	19,82
<i>Artemisia nitrosa</i> Web. ex Stechm.	4,45	55	15,65

<i>Hordeum jubatum</i> L.	1,95	55	10,37
<i>Sonchus arvensis</i> L.	2,32	45	10,21
<i>Saussurea amara</i> (L.) DC.	2,00	45	9,49
<i>Atriplex tatarica</i> L.	4,64	18	9,14
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	3,05	27	9,07
<i>Achillea nobilis</i> L.	1,18	55	8,06
<i>Artemisia abrotanum</i> L.	2,09	27	7,51
<i>Festuca valesiaca</i> Gaud.	1,09	45	7,01
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	4,55	8	6,03
<i>Poa pratensis</i> L.	1,00	27	5,20



а)



б)

Рисунок 9. Озеро Тюнтюгур: **а)** – берег озера; **б)** – *Hordeum jubatum* на озерной террасе

На озерных террасах наибольшим проективным покрытием (13,64%), и активностью (22,16) обладает *Calamagrostis epigeios*. На втором месте с небольшим отставанием находится *Phragmites australis* (активность 19,82 %). Далее следуют *Artemisia nitrosa* (15,65%), *Hordeum jubatum* (10,37 %), *Sonchus arvensis* (10,21 %), *Saussurea amara* (9,49 %), *Atriplex tatarica* (9,14 %), *Elytrigia repens* (9,07 %).

Обсуждение

При маршрутном исследовании флоры озер Костанайской области нами установлено, что общий флористический список берегов изученных озер составляет 146 видов, относящихся к 100 родам и 37 семействам высших сосудистых растений (Таблица 5).

Таблица 5

Систематический состав флоры берегов озер

Семейства	Число родов	число видов	% от общего числа видов
<i>Asteraceae</i> Dumort.	25	36	24,7
<i>Poaceae</i> Barnhart	16	19	13,0
<i>Chenopodiaceae</i> Vent.	5	10	6,8
<i>Polygonaceae</i> Juss.	2	8	5,5
<i>Cyperaceae</i> Juss.	4	7	4,8
<i>Ranunculaceae</i> Juss.	3	6	4,1
<i>Brassicaceae</i> Burnett	4	5	3,4
<i>Scrophulariaceae</i> Juss.	3	5	3,4
<i>Caryophyllaceae</i> Juss.	3	4	2,7
<i>Fabaceae</i> Lindl.	3	4	2,7
<i>Rosaceae</i> Juss.	3	4	2,7
	71	108	74,0
Остальные 26 семейств: <i>Apiaceae</i> Lindl., <i>Plantaginaceae</i> Juss., <i>Potamogetonaceae</i> Dumort., <i>Alismataceae</i> Vent., <i>Juncaceae</i> Juss., <i>Lamiaceae</i> Lindl., <i>Lemnaceae</i> S.F. Gray, <i>Salicaceae</i> Mirb., <i>Typhaceae</i> Juss., <i>Alliaceae</i> J. Agardh, <i>Butomaceae</i> L.C. Rich., <i>Dipsacaceae</i> Juss., <i>Elaeagnaceae</i> Juss., <i>Euphorbiaceae</i> Juss., <i>Frankeniaceae</i> S.F. Gray, <i>Gentianaceae</i> Juss., <i>Hydrocharitaceae</i> Juss., <i>Plumbaginaceae</i> Juss., <i>Malvaceae</i> Juss., <i>Nymphaeaceae</i> Salisb., <i>Orchidaceae</i> Adans., <i>Primulaceae</i> Vent., <i>Rubiaceae</i> Juss., <i>Sparganiaceae</i> Rudolphi, <i>Tamaricaceae</i> Link, <i>Juncaginaceae</i> L.C. Rich.	29	38	26

Одиннадцать семейств содержат 108 видов, что составляет 74 % всех видов. К ведущим по числу видов семействам относятся *Asteraceae* (36), *Poaceae* (19), и *Chenopodiaceae* (10). Высокое положение *Chenopodiaceae* связано с наличием засоленных озер и формирования по берегам галофитного комплекса видов. Наибольшим таксономическим разнообразием отличается род *Artemisia*. Фитоценотический анализ показал, что во флоре берегов озер отмечается большое количество сорных растений (17 % от общего числа видов). Сумма активности сорных видов наибольшая в зоне озерных террас – 43,5% от общей активности и в супралиторальной зоне – 11,8%. Среди сорных видов обращает внимание довольно высокую встречаемость и активность *Hordeum jubatum*. *H. jubatum* заносной, инвазионный вид, который широко распространяется по антропогенно нарушенным землям. Повсеместное внедрение и натурализация агрессивных заносных видов приводит к смене существующих растительных сообществ на обедненные замещающие с доминированием чужеродных видов, что отрицательно сказывается на

биоразнообразии региона. *Hordeum jubatum* является аборигенным на большей части Северной Америки, а также на севере Восточной Сибири [28]. В Северной Америке и на Аляске во второй половине XX в. он стал быстро расселяться по нарушенным обитаниям [29, 30]. В Казахстане он впервые был отмечен в середине XX века в окр. г. Дзезказган Н.В. Павловым [31]. В настоящее время вид внесен в Черную книгу Средней полосы России [32] и Черную книгу флоры Сибири [33].

Заключение

В результате флористических исследований установлено, что общий флористический список берегов изученных озер включает 146 видов, относящихся к 100 родам и 37 семействам высших сосудистых растений.

Литоральная зона представлена 29 видами. Наибольшей активностью пресноводных озер обладает *Phragmites australis*, который на большинстве пресноводных озер образует широкую полосу до 100 (150) м. Видовой состав представлен в основном гидрофитами (*Batrachium rionii*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Lemna minor*, *L. trisulca*, *Potamogeton lucens*, *P. natans*, *P. perfoliatus*) и гидрогигрофитами, среди которых наибольшее участие принимают *Agrostis stolonifera*, *Bolboschoenus planiculmis*, *Phragmites australis*, *Triglochin palustre*, *Typha latifolia* и др.).

Супралиторальная зона представлена 56 видами. В супралиторальной зоне наибольшим проективным покрытием (35,62 %), встречаемостью (62%) и активностью (46,99) обладает *Phragmites australis*. Высокой активностью обладают *Calamagrostis epigeios* (10,72%), *Bolboschoenus planiculmis* (5,88 %), *Artemisia abrotanum* (5,32%), *Bidens tripartite* (4,98%), *Tripolium pannonicum* (4,41%), *Elytrigia repens* (4,16%). На супралиторальной зоне засоленных озер наибольшей активностью обладает *Salicornia perennans* (11,21), а также *Puccinellia distans* (7,70), *P. tenuiflora* (2,84), *Atriplex cana* и *Suaeda corniculata* (по 3,87).

Флора озерных террас насчитывает 94 вида. Наибольшим проективным покрытием (13,64%), и активностью (22,16) обладает *Calamagrostis epigeios*. На втором месте с небольшим отставанием находится *Phragmites australis* (активность 19,82 %). Далее следуют *Artemisia nitrosa* (15,65%), *Hordeum jubatum* (10,37 %), *Sonchus arvensis* (10,21 %), *Saussurea amara* (9,49 %), *Atriplex tatarica* (9,14 %), *Elytrigia repens* (9,07 %).

Среди сорных видов обращает внимание довольно высокая встречаемость и активность адвентивного, инвазионного вида *Hordeum jubatum*. В супралиторальной зоне его встречаемость составляет 23 %, активность – 4,98 %, а на озерных террасах встречаемость составляет 55 %, активность – 15,65 %.

Отмечена высокая антропогенная нагрузка на супралиторальную зону и озерные террасы, что выражается в большом количестве синантропных растений (25 видов), что составляет в общем 17 % от общего числа видов. Это свидетельствует об экологическом неблагополучии прибрежных зон.

Таким образом, антропогенная трансформация берегов изученных озер в настоящее время выражается как в заносе ряда адвентивных видов, так и в трансформации, исчезновении естественных растительных сообществ и появлении новых – синантропных группировок растений.

Вклад авторов

Г.Ж.С., А.Н.К., О.А.К., С.Б.К., А.У.Ы., и В.Н.Ч. – проведение исследований и/или написание научной работы.

Финансирование

Работа выполнена по научно-технической программе BR24992785 «Организация и проведение комплексных исследований по обеспечению устойчивого развития агропромышленного комплекса Костанайской области с созданием научно-исследовательского технологического центра».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

Список литературы

1. Министерство экологии и природных ресурсов Республики Казахстан. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2022 год [Интернет]. Астана; 2023 [цитировано 30 сентября 2025]. Доступно по: <http://ecogofond.kz>
2. Мякишева НВ, Жумангалиева ЗМ. Особенности морфометрии и пространственного распределения озер Казахстана. Ученые записки РГГМУ. 2013;29:17–28.
3. Озера Северного Казахстана. Алма-Ата: АН КазССР; 1960. 239 с.
4. Озера Казахстана и Киргизии и их история. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние; 1975. 279 с.
5. Querry ND, Harper KA. Structural diversity as a habitat indicator for endangered lakeshore flora using an assemblage of common plant species in Atlantic Canada. Plant Ecol. 2017;218:1339–53. doi.org/10.1007/s11258-017-0772-4
6. Smith CM. Changed and changing vegetation. Sci N Z. 1957;123–36.
7. Macmillan BH. Shore line flora and vegetation of Lake Pukaki, South Canterbury, New Zealand. N Z J Bot. 1979;17:23–42.
8. Капитонова ОА. Особенности трансформации региональной флоры макрофитов в условиях урбанизированной среды. В: Овеснов СА, Баранова ОГ, редакторы. Ботанико-географические исследования. Камелинские чтения: сб. науч. тр. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та; 2019. С. 78–83.
9. Bondareva LG, Kalyakina OP. The study of accumulation of Fe(III) by *Elodea canadensis* using analytical methods: ion chromatography, ion measurement and spectrophotometry. J Siberian Fed Univ Chem. 2008;1(3):269–76.
10. Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. J Environ Manage. 2011;92:407–18.
11. Рычин ЮВ. Флора гигрофитов. М.: Наука; 1948. 448 с.
12. Кузьмичев АИ. Гигрофильная флора юго-запада Русской равнины и ее генезис. СПб.: Гидрометеиздат; 1992. 215 с.

13. Свириденко БФ. Флора и растительность водоемов Северного Казахстана. Омск: ОмГПУ; 2000. 196 с.
14. Дурникин ДА. Изученность флоры и растительности водоемов и водотоков юга Обь-Иртышского междуречья. *Acta Biol Sibir.* 2015;1(3-4):61-75. doi:10.14258/abs.v1i1-2.788
15. Киприянова ЛМ. Современное состояние водной и прибрежно-водной растительности Чановской системы озер. *Сиб экол журн.* 2005;12(2):201-13.
16. Таран ГС. К синтаксономии пойменного эфемеретума Черного Иртыша. *Сиб биол журн.* 1993;(5):79-84.
17. Таран ГС. Малоизвестный класс растительности бывшего СССР – пойменный эфемеретум (*Isoëto-Nanojuncetea Br.-Bl. et Tx.* 43). *Сиб. экол. журн.* 1995;2(4):373-82.
18. Naiman RJ, Décamps H, Johnston CA. The potential importance of boundaries of fluvial ecosystems. *J Am Benthol Soc.* 1988;7(4):289-306.
19. Naiman RJ, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annu Rev Ecol Syst.* 1997;28:621-58.
20. Новиков ВА, Царалунга ВВ. Результаты комплексного исследования динамики зарастания водной растительностью верховий Воронежского водохранилища. *Современные проблемы науки и образования.* 2015;(5) [Интернет]. [цитировано 10 фев 2025]. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21934>
21. Полевая геоботаника. Под ред. Лавренко ЕМ, Корчагин АА. Т. 5. М.; Л.: Наука; 1976. 320 с.
22. Работнов ТА. Фитоценология. 3-е изд. М.: МГУ; 1992. 352 с.
23. Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир; 1967. 368 с.
24. Никитин ВВ. Сорные растения СССР. Л.: Наука; 1983. 454 с.
25. Ульянова ТН. Сорные растения во флоре России и сопредельных государств. Барнаул: Изд-во АлтГУ; 2005. 297 с.
26. Куприянов АН, Казьмина СС, Зверев АА. Изменение флористического состава растительных сообществ Караканского хребта вблизи угольных разрезов. *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология.* 2018;(43):66-88. doi:10.17223/19988591/43/4
27. Зверев АА. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова. Томск: ТМЛ-Пресс; 2007. 304 с.
28. von Bothmer R, Baden C, Jacobsen N. *Hordeum L.* In: *Flora of North America North of Mexico.* Vol 24. New York; Oxford: Oxford Univ Press; 2007. p. 241-52.
29. Klein H. *Hordeum jubatum L.* Alaska Natural Heritage Programme; 2011a [Internet]. [cited 2025 Apr 30]. Available from: http://aknhp.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/2013/01/Hordeum_jubatum_BIO_HOJU.pdf
30. Elven R, editor. *Annotated Checklist of the Panarctic Flora (PAF). Vascular plants;* 2015 [Internet]. [cited 2025 Jul 13]. Available from: <http://nhm2.uio.no/paf>
31. Куприянов АН. Конспект флоры Казахского мелкосопочника. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео»; 2020. 423 с.
32. Виноградова ЮК, Майоров СР, Хорун ЛВ. *Черная книга флоры Средней России.* М.: ГЕОС; 2010. 512 с.
33. *Черная книга флоры Сибири.* Под ред. Виноградовой ЮК, Куприянова АН. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео»; 2016. 440 с.

Қостанай облысы көлдерінің флористикалық ерекшеліктері

Г.Ж. Сұлтангазина^{*1}, А.Н. Куприянов², О.А. Куприянов², С.Б. Куанышбаев¹,
А.У. Ысқақ¹, В.Н. Чашков¹

¹Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай, Қазақстан

²Кузбас ботаникалық бағы, РҒА СБ көмір және көмір химиясы Федеральді зерттеу орталығы,
Кемерово, Ресей Федерациясы

Аңдатпа. Зерттеу нәтижесінде Қостанай облысының дала аймағындағы 12 табиғи көлдің (8 тұщы және тұздылығы әртүрлі дәрежелі 4 көл) жағалау флоралық құрамына қатысты жаңа іргелі білім алынды. Көлдердің флористикалық құрамының ерекшеліктері үш аймақта (литоральды, супралиторальды және көлдік терраса) зерттелді. Зерттелген көлдердің жағалауындағы жоғары сатыдағы түтікті өсімдіктердің жалпы флоралық тізімі 100 туыс пен 37 тұқымдасқа жататын 146 түрден тұрады. Литоральды аймақта 29 түр анықталды. Тұщы көлдерде ең жоғары белсенділік көрсететін түр – *Phragmites australis*, ол көптеген тұщы көлдерде ені 100–150 метрге дейін жететін кең белдеу түзеді. Түрлік құрамы негізінен гидрофиттер мен гидрогигрофиттерден тұрады. Супралиторальды аймақта 56 түр кездеседі. Бұл аймақта *Phragmites australis* проективті жамылғысы (35,62%), кездесу жиілігі (62%) және белсенділігі (46,99) бойынша басым. Тұзды көлдердің супралиторальды аймағында ең белсенді түр – *Salicornia perennans* (11,21). Көл террасаларының флорасында 94 түр бар. Бұл аймақта *Calamagrostis epigeios* проективті жамылғы (13,64%) және белсенділік (22,16%) бойынша басым. Көл жағалауларының флорасы арамшөптердің көптігімен сипатталады – 25 түр, бұл жалпы түр санының 17%-ын құрайды. Арамшөптердің ішінде *Hordeum jubatum* кең таралған және белсенді, бұл Солтүстік Америка мен Шығыс Сібірдің солтүстік бөлігінде өсетін интродуцентті және инвазиялық түр.

Түйін сөздер: Қазақстан көлдері, тұщы және тұзды көлдер, флористикалық алуан түрлілік, литоральды аймақ, супралиторальды аймақ, көлдік терраса

Floristic features of the Kostanay region's lakes

G.Zh. Sultangazina¹, A.N. Kupriyanov², O.A. Kupriyanov², S.B. Kuanyshbaev¹,
A.U. Yshak¹, V.N. Chashkov¹

¹Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan

²Kuzbass Botanical Garden, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS,
Kemerovo, Russian Federation

Abstract. As a result of the study, new fundamental knowledge was obtained on the floristic composition of the shores of 12 natural lakes in the steppe zone of the Kostanay Region (8 freshwater and 4 saline to varying degrees). The study of floristic features was carried out on the littoral, supralittoral zones, and the lake terrace. The total floristic list of the shores of the studied lakes is 146 species belonging to 100 genera and 37 families of higher vascular plants. The littoral zone is represented by 29 species. *Phragmites australis* has the highest activity in freshwater lakes, forming a wide strip up to 100 (150) m in most freshwater lakes. The species composition is mainly represented by hydrophytes and hydrohygrophytes. The supralittoral zone is represented by 56 species. *Phragmites australis* has the

highest projective coverage (35.62%), occurrence (62%), and activity (46.99). In the supralittoral zone of saline lakes, *Salicornia perennans* is the most active species (11,21). The flora of the lake terraces includes 94 species. *Calamagrostis epigeios* has the highest projective coverage (13.64%) and activity (22.16%). The flora of the lake shores is characterized by a large number of weeds (25 species), which accounts for 17% of the total number of species. Among the weeds, the adventive and invasive species *Hordeum jubatum*, which is native to most of North America and northern Eastern Siberia, is highly prevalent and active.

Keywords: lakes of Kazakhstan, freshwater and saline lakes, floristic diversity, littoral zone, supralittoral zone, lake terrace

References

1. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. National report on the state of the environment and the use of natural resources of the Republic of Kazakhstan for 2022 [Internet]. Astana; 2023 [cited 2025 Sep 30]. Available from: <http://ecogofond.kz>
2. Myakisheva NV, Zhumangalieva ZM. Osobennosti morfometrii i prostranstvennogo raspredelenija ozer Kazakhstana [Features of morphometry and spatial distribution of lakes in Kazakhstan]. Uchenye zapiski RGGMU [Scientific Notes of RSHU]. 2013;29:17–28. [in Russian]
3. Oзера Severnogo Kazakhstana [Lakes of Northern Kazakhstan]. Alma-Ata: Academy of Sciences of the Kazakh SSR; 1960. 239 p. [in Russian]
4. Oзера Kazakhstana i Kirgizii i ikh istorija [Lakes of Kazakhstan and Kyrgyzstan and their history]. Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie [Science, Leningrad Branch]; 1975. 279 p. [in Russian]
5. Querry ND, Harper KA. Structural diversity as a habitat indicator for endangered lakeshore flora using an assemblage of common plant species in Atlantic Canada. Plant Ecol. 2017;218:1339–53. doi.org/10.1007/s11258-017-0772-4
6. Smith CM. Changed and changing vegetation. Science in New Zealand. 1957:123–36.
7. Macmillan BH. Shore line flora and vegetation of Lake Pukaki, South Canterbury, New Zealand. N Z J Bot. 1979;17:23–42.
8. Kapitonova OA. Features of the transformation of regional macrophyte flora in an urbanized environment. In: Ovesnov SA, Baranova OG, editors. Botanical and geographical studies. Kamelin Readings: Proceedings. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2019. p. 78–83. [in Russian]
9. Bondareva LG, Kalyakina OP. The study of accumulation of Fe(III) by *Elodea canadensis* using analytical methods: ion chromatography, ion measurement and spectrophotometry. J Siberian Fed Univ Chem. 2008;1(3):269–76.
10. Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. J Environ Manage. 2011;92:407–18.
11. Rychin Yu. Flora gigrofotov [Flora of hygrophytes]. Moscow: Nauka [Science]; 1948. 448 p. [in Russian]
12. Kuz'michev AI. Gigrofil'naja flora yugo-zapada Russkoj ravniny i ee genezis [Hygrophilous flora of the southwestern Russian Plain and its genesis]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House]; 1992. 215 p. [in Russian]
13. Sviridenko BF. Flora i rastitel'nost' vodoemov Severnogo Kazakhstana [Flora and vegetation of water bodies in Northern Kazakhstan]. Omsk: OmGPU [Omsk State Pedagogical University]; 2000. 196 p. [in Russian]

14. Durnikin DA. Izuchennost' flory i rastitel'nosti vodoemov i vodotokov juga Ob'-Irtyshskogo mezhdurech'ja [Study of flora and vegetation of water bodies and watercourses of the southern Ob-Irtysh interfluve]. *Acta Biol Sibir*. 2015;1(3-4):61-75. doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.788 [in Russian]
15. Kipriyanova LM. Sovremennoe sostojanie vodnoj i pribrezhno-vodnoj rastitel'nosti Chanovskoj sistemy ozer [Current state of aquatic and coastal-aquatic vegetation in the Chany lake system]. *Sibirskiy ekologicheskij zhurnal [Siberian Journal of Ecology]*. 2005;12(2):201-13. [in Russian]
16. Taran GS. K sintaksonomii pojmennogo efemeretuma Chernogo Irtysha [On the syntaxonomy of floodplain ephemeral vegetation of the Black Irtysh]. *Sibirskij biologicheskij zhurnal [Siberian Biological Journal]*. 1993;(5):79-84. [in Russian]
17. Taran GS. Maloizvestnyj klass rastitel'nosti byvshego SSSR – pojmennyy efemeretum (Isoëto-Nanojuncetea Br.-Bl. et Tx. 43) [A little-known class of vegetation in the former USSR – floodplain ephemeral communities]. *Sibirskiy ekologicheskij zhurnal [Siberian Journal of Ecology]*. 1995;2(4):373-82. [in Russian]
18. Naiman RJ, Décamps H, Johnston CA. The potential importance of boundaries of fluvial ecosystems. *J Am Benthol Soc*. 1988;7(4):289-306.
19. Naiman RJ, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annu Rev Ecol Syst*. 1997;28:621-58.
20. Novikov VA, Tsaralunga VV. Rezul'taty kompleksnogo issledovaniya dinamiki zarastaniya vodnoj rastitel'nost'ju verkhovij Voronezhskogo vodokhranilishcha [Results of a complex study of overgrowing dynamics of aquatic vegetation in the upper reaches of the Voronezh Reservoir]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. 2015;(5). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21934> [in Russian]
21. Polevaja geobotanika [Field Geobotany]. Lavrenko EM, Korchagin AA, eds. Vol. 5. Moscow, Leningrad; 1976. 320 p. [in Russian]
22. Rabotnov TA. Fitotsenologiya [Phytocenology]. 3rd ed. Moscow: Moscow State University Press; 1992. 352 p. [in Russian]
23. Greig-Smith P. Kolichestvennaya ekologiya rastenij [Quantitative Plant Ecology]. Moscow; 1967. 368 p. [in Russian]
24. Nikitin VV. Sornye rastenija SSSR [Weeds of the USSR]. Leningrad: Nauka [Science]; 1983. 454 p. [in Russian]
25. Ulyanova TN. Sornye rastenija vo flore Rossii i sopredel'nyh gosudarstv [Weeds in the flora of Russia and neighboring countries]. Barnaul; 2005. 297 p. [in Russian]
26. Kupriyanov AN, Kazmina SS, Zverev AA. Izmenenie floristicheskogo sostava rastitel'nyh soobshhestv Karakanskogo hrebta vblizi ugol'nyh razrezov [Changes in the floristic composition of plant communities of the Karakan Ridge near coal mines]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Tomsk State Univ. Bulletin. Biology]*. 2018;(43):66-88. doi.org/10.17223/19988591/43/4 [in Russian]
27. Zverev AA. Informacionnye tehnologii v issledovaniyah rastitel'nogo pokrova [Information technologies in vegetation cover studies]. Tomsk: TML-Press; 2007. 304 p. [in Russian]
28. Bothmer R von, Baden C, Jacobsen NH. *Hordeum* L. In: Flora of North America Editorial Committee, eds. Flora of North America North of Mexico. Vol. 24. New York; Oxford: Oxford Univ Press; 2007. p. 241-52.
29. Klein H. *Hordeum jubatum* L. Alaska Natural Heritage Programme; 2011a [Internet]. Available from: http://aknhp.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/2013/01/Hordeum_jubatum_BIO_HOJU.pdf (accessed 2025 Apr 30).

30. Elven R, ed. Annotated Checklist of the Panarctic Flora (PAF). Vascular plants; 2015 [Internet]. Available from: <http://nhm2.uio.no/paf> (accessed 2025 Jul 13).
31. Kupriyanov AN. Konspekt flory Kazahskogo Melkosopochnika [Conspectus of the flora of the Kazakh Upland]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo" [Academic Publishing "Geo"]; 2020. 423 p. [in Russian]
32. Vinogradova Yu, Mayorov SR, Khorun LV. Chernaja kniga flory Srednej Rossii [Black Book of the Flora of Central Russia]. Moscow: GEOS; 2010. 512 p. [in Russian]
33. Vinogradova Yu, Kupriyanov AN, eds. Chernaja kniga flory Sibiri [Black Book of the Flora of Siberia]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo" [Academic Publishing "Geo"]; 2016. 440 p. [in Russian]

Сведения об авторах:

Султангазина Гульнар Жалеловна – автор-корреспондент, кандидат биологических наук, профессор, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы», просп. Абая, 28, 110000, Костанай, Казахстан.

Куприянов Андрей Николаевич – доктор биологических наук, Кузбасский ботанический сад, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Ленинградский просп., 10, 650000, Кемерово, Россия.

Куприянов Олег Андреевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Кузбасский ботанический сад, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Ленинградский просп., 10, 650000, Кемерово, Россия.

Куанышбаев Сеитбек Бекенович – доктор географических наук, председатель Правления – ректор, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы», просп. Абая, 28, 110000, Костанай, Казахстан.

Ыскак Алия Узбековна – кандидат сельскохозяйственных наук, директор Научно-исследовательского института прикладной биотехнологии, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы», просп. Абая, 28, 110000, Костанай, Казахстан.

Чашков Вадим Николаевич – магистр химии, заведующий лабораторией физико-химических и технологических исследований, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы», просп. Абая, 28, 110000, Костанай, Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Сұлтанғазина Гүлнар Жалелқызы – хат-хабар авторы, биология ғылымдарының кандидаты, профессор, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Абая даңғылы 28, 110000, Қостанай, Қазақстан.

Куприянов Андрей Николаевич – биология ғылымдарының докторы, Кузбасс ботаникалық бағы, Көмір және көмірхимиясы бойынша Сібір федералды ғылыми-зерттеу орталығы, Ленинград даңғылы 10, 650000, Кемерово, Кемерово, Ресей.

Куприянов Олег Андреевич – биология ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Кузбасс ботаникалық бағы, Көмір және көмірхимиясы бойынша Сібір федералды ғылыми-зерттеу орталығы, Ленинград даңғылы 10, 650000, Кемерово, Кемерово, Ресей.

Куанышбаев Сейтбек Бекенұлы – география ғылымдарының докторы, Басқарма төрағасы – ректор, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Абай даңғылы 28, 110000, Қостанай, Қазақстан.

Ысқақ Әлия Өзбекқызы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Қолданбалы биотехнология ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Абай даңғылы 28, 110000, Қостанай, Қазақстан.

Чашков Вадим Николаевич – химия магистрі, физика-химиялық және технологиялық зерттеулер зертханасының меңгерушісі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Абай даңғылы 28, 110000, Қостанай, Қазақстан.

Authors' information:

Gulnar Sultangazina – Corresponding Author, Candidate of Biological Sciences, Professor, NLC “Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University”, 28 Abai Ave., 110000, Kostanay, Kazakhstan.

Andrey Kupriyanov – Doctor of Biological Sciences, Kuzbass Botanical Garden, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS, 10 Leningradsky Ave., 650000, Kemerovo, Russia.

Oleg Kupriyanov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Kuzbass Botanical Garden, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS, 10 Leningradsky Ave., 650000, Kemerovo, Russia.

Seitbek Kuanyshbayev – Doctor of Geographical Sciences, Chairman of the Board – Rector, NLC “Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University”, 28 Abai Ave., 110000, Kostanay, Kazakhstan.

Aliya Yskak – Candidate of Agricultural Sciences, Director of the Research Institute of Applied Biotechnology, NJSC “Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University”, 28 Abai Ave., 110000, Kostanay, Kazakhstan.

Vadim Chashkov – Master of Chemistry, Head of the Laboratory of Physicochemical and Technological Research, NLC “Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University”, 28 Abai Ave., 110000, Kostanay, Kazakhstan.



МРНТИ 34.29.35

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-123-146>

Научная статья

Чужеродные древесные растения Улытауского региона: инвазионный потенциал и пути натурализации

А.С. Есжанова¹, А. Абдухадыр*¹, В.А. Масалова¹, Г.Т. Ситпаева¹, Н.Е. Зверев¹,
В.Г. Эпиктетов¹, Б.К. Билибаева¹, И.В. Бабай¹, С.В. Набиева¹, К.С. Избастина^{2,3}

¹Институт ботаники и фитоинтродукции, Алматы, Казахстан

²Астанинский ботанический сад, Институт ботаники и фитоинтродукции, Астана, Казахстан

³Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина, Астана, Казахстан

Аннотация. Настоящее исследование посвящено изучению распространения и экологической оценки чужеродных древесных и кустарниковых видов на территории Жанааркинской и Улытауских районов Улытауской области Центрального Казахстана. Актуальность темы обусловлена необходимостью раннего выявления и оценки потенциальной инвазионной опасности интродуцированных видов в условиях степных и лесостепных экосистем, уязвимых к внешнему воздействию. Целью исследования являлось выявление чужеродных древесных растений в природных биоценозах региона. В задачу исследований входило определение статуса натурализации инвазионных видов, установление возможного источника их распространения, оценка агрессивности, масштабы распространения, угроза аборигенной флоре и пути снижения риска занесения инвазионных растений в естественные растительные сообщества. Исследования показывают, что оценка чужеродной дендрофлоры в данном регионе ранее не изучалась, особенно с учетом степени натурализации, характером распространения, а также влияния на аборигенную растительность. Научная новизна заключается в комплексной оценке чужеродной дендрофлоры в ранее слабоизученном регионе, с учетом степени натурализации, характера распространения и взаимодействия с аборигенной растительностью. В работе использованы полевые маршрутные обследования, таксономический анализ, шкала оценки инвазивности на основе модифицированной классификации «Кодекса управления инвазионными чужеродными видами растений в ботанических садах стран СНГ», а также методы сравнительного флористического анализа. В результате исследований в Улытауской области был выявлен 21 чужеродный древесный таксон, преимущественно культивированный в рамках лесомелиоративных мероприятий или озеленения населённых пунктов. Установлено, что чужеродные древесные растения, такие, как *Acer negundo*, *Populus balsamifera*, *Fraxinus americana*, преимущественно демонстрируют спорадический характер распространения, не проявляя высокой степени

Поступила: 15.09.2025. Одобрена: 30.09.2025. Доступна онлайн: 30.09.2025.

*Автор-корреспондент: ainagul_379@mail.ru

агрессивности (ранг 0–3). Однако наличие единичных всходов за пределами материнских крон и признаки генеративной активности у некоторых таксонов указывают на потенциальную инвазионную опасность. Полученные данные имеют практическое значение при планировании лесовосстановительных и природоохранных мероприятий в засушливых зонах Казахстана.

Ключевые слова: Улытау, чужеродные растения, инвазионная дендрофлора, ранг агрессивности

Введение

Изучение инвазивных видов растений стало важнейшим направлением современного экологического мониторинга после классической работы Ч. Элтона (*Elton*, 1958), который впервые обозначил сущность биологических инвазий и их разрушительное влияние на экосистемы [1]. В последующие десятилетия внимание исследователей сосредоточилось на выявлении факторов успеха инвазивных видов, таких, как гипотеза «Evolution of Increased Competitive Ability» (EICA), объясняющая, как отсутствие натуралистических врагов позволяет инвазивным видам перераспределять ресурсы в пользу роста и размножения [2]. В мировом масштабе исследования последних десятилетий демонстрируют растущую угрозу чужеродных растений на местные экосистемы, на сельское хозяйство, промышленность, инфраструктуру и на здоровье человека [3]. Инвазивные виды способны вытеснять аборигенные растения посредством прямой конкурентной борьбы за ресурсы среды обитания, а также за счёт аллелопатических эффектов, угнетающих рост и развитие соседних видов [4,5]. Кроме того, они представляют потенциальную угрозу генетическому разнообразию местной флоры, вызывая межвидовую гибридизацию с аборигенными видами [6]. Воздействие таких видов на экосистему может распространяться и на животный мир, нарушая устойчивость и трофическую структуру местных биоценозов [7].

В течение длительного времени на территории Казахстана осуществлялась активная интродукция древесно-кустарниковых растений в лесные массивы, озеленение дорог, охватывающая как видовые, так и декоративные растения. В местах формирования населённых пунктов человек целенаправленно внедрял новые для региона таксоны с целью повышения комфортности окружающей среды [8]. В частности, были широко интродуцированы культивары плодовых деревьев. Одновременно проводились мероприятия по озеленению населённых пунктов с использованием быстрорастущих интродуцированных декоративных видов, таких, как *Acer negundo* L., *Ulmus laevis* Pall., *Syringa vulgaris* L., *Ulmus pumila* L. *Ribes aureum* Pursha, а также закладывались полевозащитные лесные полосы для охраны сельскохозяйственных земель от ветровой и водной эрозии. В 1950-1960-х годах в связи с масштабным строительством автомобильных дорог началась активная реализация проектов по созданию дорожных лесозащитных насаждений [9,10]. Кроме того, с целью увеличения лесистости страны осуществлялось искусственное лесоразведение на территории природных экосистем, такие работы проводятся и по сей день.

Изучением инвазионной (чужеродной) флоры в Казахстане уделено внимание сравнительно недавно. В принятом в 2023 году Законе РК «О растительном мире» № 183 VII от 2 января 2023 года официально введено понятие «чужеродный вид растений – вид растений, несвойственный для данной территории, который в случае проникновения в естественные растительные сообщества может нанести вред растительному миру», а также впервые установлены требования к фитосанитарному мониторингу, выявлению и борьбе с чужеродными видами растений, включая их распространение как угрозу растительному миру (Глава 1, статья 1, п.23, Закон РК «О растительном мире» № 183 VII от 2 января 2023 года).

В 2024 году впервые задокументированы крупные очаги *Heracleum sosnowskyi* и *Echinocystis lobata* на юго-востоке страны, способные формировать плотные заросли и нарушать естественные сообщества [11]. В аграрной зоне Алматы зафиксированы инвазивные и карантинные виды, в том числе *Ambrosia artemisiifolia*, *Cuscuta* spp. и *Acroptilon repens*, оказывающие отрицательное влияние на сельхозугодья и урожайность [12].

В 2023 году учёными Института ботаники и фитоинтродукции была опубликована первая в истории Казахстана «Чёрная книга Алматинской области», в которой обобщены сведения о 71 наиболее широко распространённом инвазивном виде сосудистых растений региона [13]. Несмотря на региональный охват исследования, положительная динамика расселения инвазивных видов фиксируется на всей территории Казахстана, что свидетельствует об усилении биологических инвазий в масштабах страны. В связи с этим раннее выявление и мониторинг очагов распространения инвазивных видов представляют собой ключевой элемент эффективной системы превентивных мер, направленных на ограничение их дальнейшего проникновения и снижение негативных эколого-экономических последствий. Экологические и экономические убытки, обусловленные распространением чужеродных инвазивных растений, обуславливают необходимость безотлагательного принятия нормативно-правовых мер как на уровне региональных правительств, так и со стороны ответственных органов управления природными ресурсами [14]. Эффективное противодействие биологическим инвазиям требует их рассмотрения в контексте международного сотрудничества и координации усилий на глобальном уровне [15]. Несмотря на нарастающую актуальность проблемы биологических инвазий, в странах Центральной Азии до недавнего времени отсутствовали систематические исследования, направленные на инвентаризацию чужеродных растений. В частности, в таких государствах, как Казахстан, Таджикистан и Туркменистан, национальные перечни интродуцированных и инвазивных видов сосудистой флоры не были официально сформированы [3].

В 2024-2025 гг. в рамках реализации программы «Создание Кадастра растений Улытауской области как реализация задач Закона РК «О растительном мире» для устойчивого использования ботанических ресурсов региона» были проведены целевые экспедиционные исследования в область Улытау на природные территории Жанааркинского и Улытауского районов, расположенных в Центральном Казахстане. Основной целью настоящего исследования являлась инвентаризация чужеродных древесных видов, интродуцированных или натурализовавшихся в составе природных популяций указанных регионов. Выявление естественной древесно-кустарниковой

флоры обследуемых регионов для изучения степени проникновения в эти сообщества чужеродных видов. В связи с этим в задачу исследований входило определение статуса натурализации инвазионных видов (установление возможного источника их распространения), оценка агрессивности, масштабы распространения, угроза аборигенной флоре и пути снижения риска занесения растений в естественные растительные сообщества.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования выступает территория Улытауского района, занимающая площадь 12 293 105 га. Согласно данным Национального заповедника-музея «Улытау» и сводным климатическим характеристикам Куприянова, регион отличается резко континентальным и засушливым климатом. Летний период характеризуется высокими температурами, достигающими +45 °С, тогда как зимой отмечаются сильные морозы с минимумами до -46 °С. Количество осадков в холодный сезон (с ноября по март) варьирует в пределах 50–75 мм. Снежный покров колеблется от 12 см на юге до 20 см на севере района, достигая максимальных значений до 40 см. Это приводит к глубокой промерзлости почвы – до 2 метров. Продолжительность безморозного периода составляет 113-170 дней, вегетационный период – около 172-178 дней. Климатические условия осложняются частыми зимними бурями и снежными заносами, вызванными юго-западными ветрами, усиление которых обусловлено равнинным характером рельефа. Весна наступает быстро, переход между сезонами резкий. Основная часть годовых осадков (до 250 мм) выпадает с апреля по октябрь, с максимумом в июне. Вторая половина лета сопровождается длительной засухой, что наряду с сильными ветрами и пыльными бурями способствует иссушению почв [16,17].

Рельеф территории представлен чередованием мелкосопочных, холмистых и низкорослых форм с обширными межсочными впадинами. Гидрологическая сеть включает 12 рек, более 100 родников и 11 озер. Наиболее протяженной является река Каракенгир (около 350 км). В летний период значительная часть водоемов частично пересыхает или существенно сокращается в площади. Среди наиболее заметных озер региона следует отметить Каракойын, Ащиколь, Баракколь и Косколь.

Наши исследования ориентировались на выявление чужеродной флоры путем визуального осмотра природных сообществ и при обнаружении закладывались модельные площадки в трехкратной повторности с максимальной площадью 20x20 м, и фиксацией GPS координат. На исследуемых участках проводился учёт видового разнообразия древесной и травянистой растительности с разграничением по происхождению: аборигенные виды, преднамеренно интродуцированные древесные чужеродные виды, инвазионные таксоны, а также чужеродные виды, обладающие способностью к натурализации. Оценка осуществлялась в количественном выражении.

Степень агрессивности чужеродных видов осуществлялась по методике, предложенной в коллективной монографии «Ассортимент и каталог древесных растений, рекомендованных для озеленения г. Алматы» [18]. Для оценки агрессивности чужеродных видов в природных популяциях была адаптирована существующая методика на основе классификации, предложенной в «Кодексе управления инвазионными чужеродными

видами растений в ботанических садах стран СНГ» [13,19]. В соответствии с целями нашего исследования шкала агрессивности была модифицирована: путём объединения отдельных рангов общее количество категорий было сокращено с 10 до 9. Обновлённая версия представлена в таблице 1. Определение видовой принадлежности проводилось по Флоре Казахстана (1956-1966) и интернет-источнику Плантариум [20,21].

Таблица 1

Сравнительная таблица рангов агрессивности

Статус	Влияние на растительные сообщества по «Кодексу управления инвазионными чужеродными видами растений в ботанических садах стран СНГ»	Оценка степени агрессивности древесных чужеродных видов
Статус 1 Виды – «трансформеры»	Активно внедряются в естественные и полуестественные сообщества, изменяют облик экосистем, нарушают сукцессионные связи, выступают в качестве эдификаторов и доминантов, образуя значительные по площади одновидовые заросли, вытесняют и препятствуют возобновлению видов природной флоры	8 – Заселяется повсеместно в природные экосистемы; 9 – Установлены случаи приобретения видом доминирования в природных экосистемах с преобразованием их фитоценотического состава
Статус 2	Активно расселяющиеся и натурализующиеся в нарушенных полуестественных и естественных местообитаниях	6 – Поселяется единичными растениями за пределами участка, где произрастают материнские растения; 7 – Поселяется куртинами и рошицами далеко за пределами участка, где произрастают материнские растения
Статус 3	Расселяющиеся и натурализующиеся в настоящее время в нарушенных местообитаниях, в ходе дальнейшей натурализации некоторые из них, по-видимому, смогут внедриться в полуестественные и естественные сообщества	3 – Единичные поселения за границами крон материнского растения; 4 – Образует куртины и рошицы за пределами крон материнских растений; 5 – Заселяется повсеместно на участке, где произрастают материнские растения
Статус 4	Потенциально инвазионные виды, способные к возобновлению в местах заноса и проявившие себя в смежных регионах в качестве инвазионных видов	0 – фитоценотическая агрессивность не выявлена; 1 – Единичное поселение под кроной материнского растения; 2 – Массовое поселение под кронами материнского растения

Результаты

Для оценки инвазионного потенциала древесных чужеродных видов, выявленных на территории изучаемых природных и антропогенно трансформированных экосистем, применена сравнительная шкала агрессивности (Таблица 1). Данная классификация позволяет разграничить виды по степени их влияния на местные фитоценозы и характеру расселения. В основе подхода лежит комплексный анализ таких признаков, как способность к воспроизводству, степень натурализации, интенсивность распространения за пределами мест интродукции, а также их воздействие на структуру и динамику растительных сообществ. Каждый вид отнесён к одному из четырёх условных статусных рангов – от потенциально инвазивных до видов-трансформеров, активно замещающих аборигенную флору и модифицирующих экосистемные связи. Оценка степени агрессивности сопровождалась использованием балльной шкалы (от 1 до 9), отражающей интенсивность расселения и способность к формированию устойчивых популяций. Результаты классификации представлены ниже.

Оценка агрессивности чужеродных древесно-кустарниковых видов в Жанааркинском районе

По результатам обследования в Жанааркинском районе было зафиксировано 13 видов чужеродных древесно-кустарниковых растений (Таблица 2). Наибольшее количество участков с участием чужеродных видов зарегистрировано для *Ulmus pumila* (15 участков), *Populus balsamifera* (14 участков), *Acer negundo* (11 участков) и *Ulmus glabra* (10 участков).

Таблица 2

Точки исследования чужеродных растений в Жанааркинском районе Улытауской области

Географические координаты	Название местности	Название растений	Ранг агрессивности
N 48°56'36.91" E 71°12'55.80"	Трасса на Ынтылы, Малый Тербутай булак	<i>Malus domestica</i> (Suckow) Borkh.	0
N 48°55'38.82" E 71°04'22.82"	Трасса на Ынтылы, Лесозащитная полоса	<i>Acer negundo</i> L. <i>Ulmus pumila</i> L. <i>Ulmus glabra</i> Huds. <i>Populus balsamifera</i> L. <i>Ribes aureum</i> Pursh	0 0 0 2 0
N 48°55'3.85" E 71°0'32.21"	Трасса на Ынтылы	<i>Ulmus pumila</i> L. <i>Acer negundo</i> L.	0 0
N 48°55'38" E 70°56'53"	Территория Караагашского лесхоза	<i>Pinus sylvestris</i> L. <i>Populus balsamifera</i> L. <i>Ulmus pumila</i> L. <i>Fraxinus americana</i> L. <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	1 3 0 2 0
N 48°52'41.23"	Водохранилище	<i>Ulmus pumila</i> L.	0

E 71°35'7.71"	Гидролиз Актастинское водохранилище	<i>Populus balsamifera</i> L. <i>Caragana arborescens</i> Lam.	2 0
N 48°58'07" E 71°15'35"	Трасса КМ-4	<i>Acer negundo</i> L. <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.	4 0
N 48°46'58" E 72°02'29"	Бидаикское водохранилище на р. Сарысу	<i>Acer negundo</i> L. <i>Populus balsamifera</i> L. <i>Salix alba</i> L. <i>Ulmus pumila</i> L. <i>Ribes aureum</i> Pursh <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	4-7 3 0 0 0 0
N 48°47'12" E 71°59'05"	Р. Сарысу, Жанааркинский район, мост	<i>Elaeagnus angustifolia</i> L. <i>Acer tataricum</i> L. <i>Acer negundo</i> L. <i>Ulmus pumila</i> L. <i>Populus balsamifera</i> L.	0 0 0 0-3 2
N 48°50'31" E 72°03'46"	Река Шетен	<i>Ulmus pumila</i> L. <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	0 0
N 47°48'49.08" E 71°58'2.26"	Горы Атасу	<i>Ulmus pumila</i> L. <i>Ulmus glabra</i> Huds	0 0

Эти виды демонстрируют умеренную степень натурализации и устойчивое воспроизводство в природной среде. Особенно выражен агрессивный потенциал *Acer negundo*, который встречается на 5 участках с баллом 7, что соответствует статусу 2. Данный вид активно распространяется и проявляет способность к натурализации как в нарушенных полуестественных, так и в относительно стабильных естественных местообитаниях, осваивая новые участки и формируя устойчивые популяции за пределами зон первоначального интродуцирования (Рисунок 1а). Зафиксированы посадки Клена американского на Бидаикском водохранилище, приведшие к вытеснению естественных ивняков (*Salix caspica* Pall., *Salix cinerea* L., *Salix tenuijulis* Ledeb. и *Salix viminalis* L.)

Виды *Populus balsamifera* и *Fraxinus americana* (Рисунок 1b и 1c) продемонстрировали умеренный уровень агрессивности, не превышающий 3 баллов, соответствующий 3 статусу, на отдельных участках зафиксировано распространение за кронами материнских растений. Это может свидетельствовать о начальных стадиях натурализации данных таксонов и потенциальной возможности их дальнейшего распространения. Несмотря на отсутствие признаков высокой агрессивности, их устойчивое присутствие на нескольких участках (соответственно в Караагашском лесхозе) требует внимания, особенно в свете возможного будущего усиления их инвазионных свойств при изменении экологических условий. *P. balsamifera* демонстрирует выраженную способность к вегетативному размножению за счёт поросли, активно расселяясь в пределах лесозащитной полосы, что свидетельствует о высоком уровне его адаптационного потенциала к условиям региона.



Рисунок 1. а) Плодоношение *Acer negundo* по руслу ручья; **б)** Порослевое расселение *Populus balsamifera* в лесозащитной полосе **в)** Саморасселение *Fraxinus americana* в лесопосадках в Караагашском лесхозе

В то же время большинство других интродуцированных видов, таких, как *Malus domestica*, *Malus baccata*, *Salix alba*, *Acer tataricum*, *Caragana arborescens* и др., зарегистрированы на 1–2 участках и не проявляют признаков значительной инвазионной активности (баллы 0–2, статус 4), что может свидетельствовать об их ограниченном распространении под кронами материнских растений или начальных стадиях интродукции. Вид *Pinus sylvestris*, используемый в Караагашском лесничестве в качестве лесокультурной

породы, по результатам наших наблюдений отнесён к 1-му рангу агрессивности. При этом в отдельных случаях зафиксировано ограниченное семенное возобновление, не свидетельствующее о тенденции к активному натурализационному процессу.

Таким образом, по совокупности показателей было выявлено 3 вида (*Acer negundo*, *Populus balsamifera*, *Fraxinus americana*) с высоким инвазионным потенциалом, требующих дальнейшего мониторинга и применения мер по ограничению их распространения.

Исследования, проведённые в природных экосистемах с целью выявления чужеродных древесно-кустарниковых видов, показали, что на обследованных участках интродуценты, как правило, не проявляют выраженной агрессивности и сохраняется устойчивое присутствие аборигенной растительности. В частности, такие виды, как *Spiraea hypericifolia*, *Caragana frutex*, *Rosa cinnamomea*, *Rosa glabrifolia*, *Salix cinerea*, *Salix tenuijulis*, *Ribes aureum*, *Betula pendula*, *Juniperus sabina*, *Populus tremula*, *Lonicera tatarica*, *Tamarix sp.* и другие демонстрируют высокую устойчивость к воздействию инвазивных видов. Так, на площадках с рангом агрессивности чужеродных видов 4–7 баллов, присвоенной *Acer negundo*, *Populus balsamifera* и *Ulmus pumila*, были также зафиксированы аборигенные кустарники и деревья, включая *Spiraea hypericifolia*, *Salix spp.*, *Ribes aureum*, *Caragana frutex*, *Rosa spp.* В целом в этом районе нами зафиксировано 33 вида аборигенных древесно-кустарниковых растений.

Несмотря на наличие чужеродных деревьев на многих участках (в том числе в лесополосах, прибрежных зонах, вдоль трасс и около водохранилищ), никаких признаков полного вытеснения местных видов не зафиксировано. Вместо этого наблюдается сосуществование, при котором аборигенные растения продолжают выполнять экологические функции в биоценозах. Таким образом, местная флора демонстрирует устойчивость к инвазионному давлению, хотя на отдельных участках (особенно в лесозащитных полосах и вблизи водоёмов) требуется мониторинг в связи с возможной трансформацией растительного покрова. Полученные данные подчёркивают необходимость оценки конкурентных взаимоотношений между аборигенными и чужеродными видами, а также продолжения наблюдений за их динамикой во времени.

Оценка агрессивности чужеродных древесно-кустарниковых видов в Улытауском районе

Полевые исследования, проведённые на территории Государственного национального природного парка (ГНПП) «Улытау» и прилегающих природных участках Улытауской области, выявили значительное видовое разнообразие аборигенной древесно-кустарниковой флоры. Всего на обследованных 33 точках было выявлено 24 древесно-кустарниковых таксона. Наиболее часто встречающимися представителями коренной флоры оказались виды родов *Spiraea*, *Rosa*, *Salix*, *Populus*, *Caragana*, *Lonicera* и *Betula*, характеризующиеся широкой экологической амплитудой и способностью адаптироваться к различным микроклиматическим условиям региона. Особенно выделяются такие виды, как *Spiraea hypericifolia* L. и *Rosa glabrifolia* C.A. Mey. ex Rupr., присутствующие на большинстве обследованных площадок, включая труднодоступные горные участки и пойменные экосистемы.

Одновременно с этим на части обследованных площадок были зафиксированы 8 чужеродных древесных видов (*Acer negundo*, *Ulmus pumila*, *Populus balsamifera*, *Malus domestica* и др.), однако их распространение носит характер точечный, без образования крупных, устойчивых популяций или доминирования в сообществе (Таблица 3).

Таблица 3

Точки исследования древесно-кустарниковой флоры в Улытауском районе
Улытауской области

Название местности, географические координаты	Rosa glabrifolia C.A. Mey. ex Rupr.	
	Rubus caesius L	Инвазивные д/к виды с рангом агрессивности
Трасса Жезказган – Улытау, родник Кумысбулак N 48°02'59.08" E 67°11'05.32"	<i>Atraphaxis</i> sp <i>Spiraea hypericifolia</i> L. <i>Lonicera tatarica</i> L. <i>Rosa spinosissima</i> L. <i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Salix alba</i> L. <i>Rosa laxa</i> Retz. <i>Rosa acicularis</i> Lindl. <i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch	<i>Populus balsamifera</i> – 0 <i>Ulmus pumila</i> – 0 <i>Ulmus laevis</i> – 1 <i>Populus italica</i> – 0 <i>Malus domestica</i> – 0 <i>Acer negundo</i> – 0 <i>Syringa josikaea</i> – 0
Озеро Жумабай, ГНПП «Улы- тау» N 48°36'56.77" E 67°01'12.49"	<i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch <i>Spiraea hypericifolia</i> L. <i>Salix caprea</i> L. <i>Caragana</i> sp <i>Rosa persica</i> Michx. ex Juss. <i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Rosa spinosissima</i> L. <i>Lonicera tatarica</i> L. <i>Betula pendula</i> Roth <i>Populus tremula</i> L. <i>Salix caprea</i> L.	Не обнаружено
Горы Улытау, ГНПП «Улытау» N 48°35'48.05" E 66°57'47.71"	<i>Spiraea hypericifolia</i> L. <i>Rosa persica</i> Michx. ex Juss. <i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch <i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Populus tremula</i> L. <i>Lonicera tatarica</i> L. <i>Rosa cinnamomea</i> L. <i>Crataegus korolkowii</i> L. Henry <i>Caragana</i> sp <i>Rosa spinosissima</i> L. <i>Amygdalus nana</i> L. <i>Cotoneaster melanocarpus</i> Fisch. ex Blytt <i>Betula pendula</i> Roth <i>Juniperus sabina</i> L. <i>Cotoneaster oliganthus</i> Pojark.	<i>Ulmus pumila</i> – 0 <i>Acer negundo</i> – 0

Горы Арганаты, речка, ГНПП «Улытау» N 49°01'53.51" E 67°02'32.66"	<i>Salix</i> sp <i>Spiraea hypericifolia</i> L. <i>Rosa spinosissima</i> L. <i>Atraphaxis</i> sp <i>Populus tremula</i> L. <i>Salix caprea</i> L. <i>Betula pendula</i> Roth <i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Lonicera tatarica</i> L.	<i>Malus domestica</i> – 0
ГНПП «Улытау», река Балға N 49°20'13.24" E 66°56'31.22"	<i>Spiraea hypericifolia</i> L.	Не обнаружено
Озеро Косколь N 49°29'42.83" E 67°02'41.81"	<i>Salix viminalis</i> L.	<i>Populus balsamifera</i> – 0 <i>Ulmus pumila</i> – 0
Зимовка Шондык N 49°15'42.58" E 67°02'33.13"	<i>Salix viminalis</i> L. <i>Populus tremula</i> L. <i>Betula pendula</i> Roth <i>Salix caprea</i> L.	Не обнаружено
	<i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Rubus caesius</i> L.	
Горы Улытау, дорога вдоль реки Жетыкыз N 48°43'04.25" E 66°58'02.48"	<i>Populus tremula</i> L. <i>Betula pendula</i> Roth <i>Spiraea hypericifolia</i> L. <i>Salix viminalis</i> L. <i>Rosa glabrifolia</i> C.A. Mey. ex Rupr. <i>Salix caprea</i> L. <i>Tamarix ramosissima</i> Ledeb.	Не обнаружено

Наиболее часто встречающимся чужеродным видом оказался *Acer negundo*, отмеченный на нескольких площадках, включая территории с устойчивыми популяциями аборигенных видов. Несмотря на присутствие интродуцентов, агрессивного вытеснения местных видов зафиксировано не было. Во всех случаях интродуценты не образовывали монодоминирующих куртин и сохраняли сосуществование с коренными представителями флоры, что свидетельствует о стабильности растительных сообществ и сохранении природного облика исследуемых экосистем. Вид *Acer negundo*, интродуцированный с целью увеличения лесопокрываемой площади и зарегистрированный на пяти участках в горных районах территории ГНПП «Улытау», находится в генеративной фазе и характеризуется обильным плодоношением. Однако на момент обследования всходы под пологом материнских деревьев зафиксированы не были, что может свидетельствовать о неполной адаптации вида к специфическим экологическим условиям горной местности. Тем не менее при дальнейшем акклиматизационном успехе нельзя исключать возможность массового прорастания семян в будущем. Таким образом, данные исследования указывают на относительно невысокую степень натурализации

чужеродных видов в природных экосистемах Улытауского региона, тем не менее они подчеркивают важность продолжения мониторинга для раннего выявления возможных признаков агрессивного поведения инвазивных видов. Таким образом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о том, что большинство чужеродных видов, выявленных на обследованных территориях Улытауского района, относятся к 4-му статусу натурализации и характеризуются низким уровнем агрессивности, оцениваемым в пределах ранга 0–1.

Обсуждение

Общая площадь лесного фонда республики около 26–30 млн га, что составляет 11–13 % территории страны. Из них лесами покрыто лишь около 13,6 млн га, или примерно 5 % от всей площади [22,23]. По данным государственного учета лесного фонда, по состоянию на 01.01.2023 года лесистость в области Улытау составляет 0,1% [24]. В обследуемом нами регионе преобладают колочные леса, площадь отдельных колков небольшая, примерно от 1 до 50 га. Наиболее крупные колки, расположенные близко друг от друга, приурочены к зоне лугово-черноземных почв. Колочные леса состоят в основном из насаждений березы (*Betula pendula*) преимущественно порослевого происхождения с незначительной примесью осины (*Populus tremula*). В некоторых местах преобладает осина.

Леса Большого Улытау охватывают относительно ограниченную территорию площадью около 58 тыс. га и приурочены преимущественно к межсопочным понижениям гор Арганаты, поймам ручьев, районам вокруг родников, а также представлены отдельными небольшими колочными массивами. Основу лесных насаждений составляют осиново-берёзовые сообщества с подлеском, сформированным степными кустарниковыми видами, такими, как *Caragana frutex*, *Spiraea hypericifolia*, *Rosa acicularis*, *Rosa spinosissima*, *Cotoneaster melanocarpus*. В пойменных участках ручьев преобладают *Lonicera tatarica*, *Padus avium*, *Frangula alnus*, *Rhamnus cathartica*, *Crataegus altaica*, *Rosa laxa*, *Rosa majalis*, *Rubus caesius*. Исключительное видовое разнообразие характерно для пойменных ивняков, в составе которых наиболее часто встречаются *Salix bebbiana*, *S. caspica*, *S. pentandra*, *S. rosmarinifolia*. При этом кустарниковые заросли в поймах формируются преимущественно за счёт *S. caspica*, *S. triandra*, *S. bebbiana* с участием *Rosa acicularis* и *R. laxa* в качестве сопутствующих видов [17]. Согласно исследованиям, флора гор Улытау включает 542 вида сосудистых растений, объединённых в 282 рода и 71 семейство. Таксономическое доминирование в структуре флоры принадлежит представителям семейств *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae*, *Brassicaceae*, *Scrophulariaceae*, *Boraginaceae*, *Lamiaceae*, *Polygonaceae* и *Apiaceae*. Кроме того, зафиксировано присутствие 18 эндемичных видов, что подчёркивает высокую степень флористического своеобразия региона [25]. В работе С.А. Кубентаева (2024) представлен список 20 видов из Красной книги Казахстана, зарегистрированных в регионе, а также рекомендовано включение ещё 8 локальных эндемиков [26].

Сохранность природных лесных массивов на обследуемых территориях обеспечивается Государственным национальным природным парком «Улытау» и КГУ «Жанаркинское хозяйство по охране лесов и животного мира» управления природных ресурсов и регулирования природопользования области Улытау.

Создание первых лесных культур на территории Казахстана относится к 1881 г, расширение лесного фонда коснулось и земель Центрального Казахстана. Ранние лесозащитные мероприятия в Центральном Казахстане, включая районы Улытау, осуществлялись СССР с целью закрепления подверженных эрозии земель. В частности, в Прикаспийской и Центральной степной зонах проводились посадки саксаула и видов *Ulmus* для борьбы с ветровой эрозией и улучшения структуры земельного покрова [27]. На территории Караагашского лесничества в ходе обследования были изучены лесные посадки *Pinus sylvestris* и *Populus balsamifera*, заложенные в указанный исторический период. Распространение *P. sylvestris* в данном районе оценивается на уровне 1-го ранга агрессивности: под пологом материнских особей зафиксированы лишь единичные случаи самосево. В то же время *P. balsamifera* демонстрирует ранние признаки инвазивного поведения, поскольку его всходы отмечены за пределами крон родительских деревьев; этому виду присвоен ранг 3. Насаждения *Fraxinus americana*, высаженные преимущественно в 2000-х годах, перешли в генеративную фазу и характеризуются обильным плодоношением. Хотя массовое семенное возобновление пока отсутствует, на отдельных участках зафиксированы единичные случаи всходов, что может свидетельствовать о начале процессов натурализации.

Сопоставление результатов нашего исследования с данными, опубликованными нами ранее, проведённого на территории Жетысуской области, выявило ряд существенных различий в составе и степени инвазивности чужеродных древесных видов [28]. В Улытауской области нами зафиксировано 21 чужеродный древесный таксон, преимущественно культивированный в рамках лесомелиоративных мероприятий или озеленения населённых пунктов. Наиболее часто встречающимися стали *Acer negundo*, *Populus balsamifera*, *Ulmus pumila* и *Malus domestica*. При этом ни один из зафиксированных видов не демонстрирует признаков активной натурализации: самосев либо отсутствует вовсе, либо представлен единичными экземплярами, как в случае с *Pinus sylvestris*. Присвоенные ранги агрессивности варьируют в пределах от 0 до 3, при этом абсолютное большинство видов охарактеризованы как труднопроникающие в естественные фитоценозы и отнесены к статусу 4. В соответствии с разработанной нами модернизированной шкалой оценки, к потенциально агрессивным относят виды, которые пока не проявляют признаков инвазивности, но обладают способностью к быстрому увеличению численности и стремительному распространению. К данной группе мы относим таксоны, получившие 3 и более баллов по шкале инвазивности. Такие виды, по нашему мнению, могут оказывать влияние на сукцессионные процессы в природных биоценозах. Таким образом, растения, способные к самостоятельному распространению за пределы крон материнских особей и получившие оценку в 3 балла, следует рассматривать как потенциально инвазионные.

В отличие от этого, как показано в таблице 4, в Жетысуской области было выявлено 17 видов чужеродных древесных растений, 6 из которых отнесены к трансформирующим элементам (ранг агрессивности 6-8), демонстрирующим устойчивое семенное возобновление, формирование самоподдерживающихся популяций и вытеснение аборигенных видов [28]. Такие различия, вероятно, обусловлены как биоклиматическими факторами (меньшая аридность и большая продуктивность местообитаний Жетысу), так и степенью антропогенного воздействия, включая более широкомасштабные озеленительные работы в предгорьях Алатау.

Таким образом, флора Улытауского региона на данный момент демонстрирует устойчивость к натурализации чужеродных древесных видов, однако наличие генеративных особей (*Acer negundo*, *Populus balsamifera* и *Fraxinus americana*) требует продолжения мониторинга. Считается, что на этапе перехода от lag-фазы к фазе активного распространения у чужеродных растений происходят изменения биологических характеристик, свидетельствующие об их адаптации к новым экологическим условиям обитания [29]. Это особенно важно в условиях изменяющегося климата, способного изменить границы экологической устойчивости и повысить инвазионный потенциал ранее стабильных интродуцентов.

Таблица 4

Сравнительный анализ чужеродной дендрофлоры Улытауской и Жетысуской области

Параметр	Улытауская область	Жетысуская область [28]
Общее число зарегистрированных чужеродных видов	13	17
Наиболее часто встречающиеся чужеродные виды	<i>Acer negundo</i> , <i>Populus balsamifera</i> , <i>Ulmus pumila</i> , <i>Malus domestica</i> , <i>Fraxinus americana</i>	<i>Acer negundo</i> , <i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Prunus domestica</i> , <i>Quercus robur</i>
Ранг агрессивности (макс.)	4-7 - <i>Acer negundo</i> ; 3 - <i>Ulmus pumila</i> , <i>Populus balsamifera</i> ; 2 - <i>Fraxinus americana</i> Большинство видов – 0-1	6-8 для 6 видов (трансформеры)
Статус инвазионности	Преимущественно статус 4 (трудно натурализующиеся)	Включает статусы 1-3; 6 видов классифицированы как трансформеры
Характер самосеов	Практически отсутствует (семенное возобновление редкое или не установлено)	Зафиксированы массовые всходы и самосевы под пологом интродуцентов
Типы местообитаний	Аридные горные экосистемы, пойменные участки, колки	Мезофитные пойменные, тугайные, урбанизированные зоны
Роль аборигенных видов	Устойчивое сосуществование, отсутствие вытеснения	Отмечено вытеснение аборигенных видов на ряде участков
Вывод по инвазионной активности	Низкая, на начальной стадии натурализации	Высокая, с выраженной трансформацией сообществ
Необходимость вмешательства	Наблюдение и раннее реагирование на потенциальную натурализацию	Разработка мер по контролю, управлению и ограничению

В рамках государственной экологической политики Республика Казахстан реализует стратегические меры по увеличению лесистости территории, в соответствии с

международными обязательствами в рамках инициативы *Bonn Challenge*. В Послании Президента Республики Казахстан поставлена задача доведения уровня лесистости страны до 5 % к 2030 году, что предполагает реализацию масштабной программы, включающей посадку 2 миллиардов деревьев в лесном фонде и 15 миллионов деревьев в населённых пунктах в течение пяти лет [30]. Одним из шагов на пути выполнения данной задачи стало создание питомника в Караагашском лесничестве, где проводится выращивание посадочного материала из семян *Acer negundo*.

Выбор именно *Acer negundo* (клён американский) обусловлен его высокой скоростью роста и устойчивостью к неблагоприятным почвенно-климатическим условиям. Семенной материал был собран в близлежащих населённых пунктах, что предполагает наличие у растений адаптационных признаков к местным условиям. Однако наши исследования показали, что, несмотря на хорошие показатели приживаемости и интенсивность роста на ранних стадиях развития, использование *Acer negundo*, собственно, как и *Fraxinus americana* в озеленении природных территорий Улытауской области несёт потенциальную угрозу. В настоящее время регион отличается низким уровнем инвазии чужеродных видов по сравнению с Жетысуской областью. Опыт масштабного озеленения последней, где без достаточных ботанико-экологических оценок внедрялись чужеродные таксоны, свидетельствует о риске последующего неконтролируемого расселения и агрессивного вытеснения аборигенной флоры спустя 50-60 лет (или даже раньше). Это может повлечь за собой нарушения сукцессионных процессов и устойчивости естественных фитоценозов.

Учитывая потенциальные экологические риски, представляется более оправданным использование аборигенных древесных пород, адаптированных к природным условиям Улытауского региона, таких, как *Populus tremula*, *Betula pendula*, *Crataegus korolkowii*, *Crataegus altaica* и др. Несмотря на то, что *Pinus sylvestris* является чужеродным для данного региона, по результатам наших наблюдений вид не оказывает столь сильного влияния на трансформацию ландшафта и флористического состава, как *Acer negundo*, и может рассматриваться как приемлемый таксон для определённых задач лесоразведения.

Заключение

Проведённые исследования на территории Улытауского и Жанааркинского районов Улытауской области Республики Казахстан позволили выявить текущее состояние древесно-кустарниковой растительности и степень проникновения чужеродных видов в природные и полуестественные экосистемы региона. Несмотря на экстремальные климатические условия, выраженные в резкой континентальности климата, засушливом лете и частых ветровых явлениях, в регионе сохраняется высокое разнообразие аборигенной флоры. Установлено, что природные леса Улытау представлены в основном березовыми и осиновыми насаждениями и тугайной растительностью, приуроченными к поймам рек, родникам и межсопочным понижениям. Характерными аборигенными видами являются *Betula pendula*, *Populus tremula*, виды *Salix*, *Spiraea hypericifolia*, *Caragana frutex*, виды *Rosa*, *Crataegus*, *Lonicera tatarica* и др.

Чужеродные древесные виды, такие, как *Acer negundo*, *Populus balsamifera*, *Fraxinus americana*, *Ulmus pumila* и *Pinus sylvestris*, в большинстве случаев демонстрируют слабую

способность к натурализации и не выражают признаков активной инвазии. Согласно модернизированной шкале оценки инвазионного потенциала, их ранг агрессивности составляет от 0 до 3, что соответствует статусу низкой или потенциальной инвазивности. На отдельных участках зафиксированы единичные самосевы за пределами крон материнских деревьев, особенно у *Populus balsamifera* и *Fraxinus americana*, что требует дальнейшего мониторинга. Из всех выявленных видов только *Acer negundo* проявляет высокий ранг агрессивности (ранг 7) в Жанааркинском лесничестве, а остальные чужеродные виды являются потенциально агрессивными и требуют постоянного мониторинга.

Анализ флористического состава растений на исследуемой территории показывает, что чужеродные таксоны встречаются преимущественно в антропогенно трансформированных местообитаниях и вблизи инфраструктурных объектов (дороги, защитные лесополосы, населённые пункты). При этом случаи проникновения интродуцированных видов в относительно нетронутые природные биотопы имеют локальный характер.

Основным путем внедрения чужеродных видов в природные популяции является антропогенный фактор, а именно: высадка лесных культур из чужеродных видов в лесхозах, создание полезащитных лесных полос на сельскохозяйственных землях и озеленение автодорог и населенных пунктов. Наблюдения указывают, что основное распространение семян чужеродных таксонов от маточных растений происходит ветропереносом, а на дальние расстояния по водной поверхности рек и озер.

В настоящий момент чужеродные древесные виды в Улытауском регионе не представляют непосредственной угрозы для аборигенной флоры в природных сообществах. Однако ряд таксонов демонстрирует признаки адаптации и потенциал к натурализации, что требует внедрения постоянных мер экологического мониторинга, направленных на предотвращение возможной трансформации естественных экосистем. Полученные данные могут быть использованы для планирования мероприятий по сохранению биоразнообразия и управлению инвазивными видами в условиях Центрального Казахстана.

В результате полученных данных и анализа особенностей расселения чужеродных древесных растений на территории Улытауской области были сформулированы следующие рекомендации, направленные на предупреждение инвазивного поведения чужеродных таксонов и сохранение устойчивости природных экосистем региона:

1. Отказ от использования потенциально инвазивных видов, в том числе *Acer negundo*, в проектах облесения и озеленения природных территорий. Данный вид, несмотря на быструю приживаемость и рост, демонстрирует активное генеративное развитие, способное привести к спонтанной натурализации и распространению за пределы посадочных участков в будущем.

2. Предпочтение при озеленении отдавать аборигенным, адаптированным к условиям Улытауского региона видам, таким, как *Populus tremula*, *Betula pendula*, *Crataegus korolkowii*, *Crataegus altaica*, *Rosa glabrifolia*, *Spiraea hypericifolia* и др., обладающим высокой степенью совместимости с местной флорой.

3. Проведение предварительной биоинвазионной оценки таксонов, намеченных к внедрению в природные экосистемы, с использованием шкалы агрессивности по модифицированной классификации, адаптированной к условиям степной зоны Центрального Казахстана [13]. Виды с рангом 3 и выше рассматривать как потенциально инвазионные, даже если они пока не демонстрируют выраженного агрессивного поведения.

4. Организация мониторинга за посадками чужеродных древесных растений в природных и полустественных местообитаниях, включая контроль генеративного размножения, степень натурализации и распространение за пределы зон культивации.

5. Систематизация и публикация региональных списков чужеродных видов с учётом степени их натурализации, агрессивности и потенциального влияния на естественные биоценозы, по аналогии «Чёрной книги» Жетысуской области.

6. Внедрение ограничительных мер по посадке чужеродных видов вблизи природоохранных территорий, в том числе в зонах рекреационного лесоразведения и в буферных зонах ГНПП «Улытау», где зафиксировано наименьшее присутствие чужеродной флоры.

Эти меры направлены на снижение риска биоразнообразия и предупреждение инвазивных процессов, аналогичных уже наблюдаемым в других регионах Казахстана.

Вклад авторов

А.Е. и Г.С. – руководители исследования, критически пересмотревшие его содержание; **А.А. и В.М.** – концептуализация, исследование и обработка данных; **Н.З., В.Э. и И.Б.** – обсуждение результатов исследования, формальный анализ; **Б.Б., С.Н. и И.К.** – редактирование текста статьи. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан (грант № BR23591088).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

Список литературы

1. Richardson DM, Pyšek P. Editorial: Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton. *Divers Distrib.* 2008;14(2):161-8. doi.org/ 10.1177/0309133307087089
2. Blossey B, Nötzold R. Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis. *J Ecol.* 1995;83(5):887-9. doi.org/10.2307/2261425
3. Sennikov AN, Lazkov GA. Alien plants of Kyrgyzstan: the first complete inventory, distributions and main patterns. *Plants (Basel).* 2024;13(2):286. doi.org/10.3390/plants13020286
4. Lazzaro L, Bolpagni R, Buffa G, Gentili R, Lonati M, Stinca A, et al. Impact of invasive alien plants on native plant communities and Natura 2000 habitats: state of the art, gap analysis and perspectives in Italy. *J Environ Manag.* 2020;274:111140. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111140

5. Kalisz S, Kivlin SN, Bialic-Murphy L. Allelopathy is pervasive in invasive plants. *Biol Invasions*. 2021;23:367-71. doi.org/10.1007/s10530-020-02383-6
6. Bleeker W, Schmitz U, Ristow M. Interspecific hybridization between alien and native plant species in Germany and its consequences for native biodiversity. *Biol Conserv*. 2007;137:248-53. doi.org/10.1016/j.biocon.2007.02.004
7. Fletcher RA, Brooks RK, Lakoba VT, Sharma G, Heminger AR, Dickinson CC, et al. Invasive plants negatively impact native, but not exotic, animals. *Glob Chang Biol*. 2019;25:3694-705. doi.org/10.1111/gcb.14752
8. Сарсенова СГ, Ботанова ЖК. Парки и скверы города Алматы. 1868–1916 гг.: сборник архивных документов и материалов. Алматы: 2004.
9. Каргов ВА. Лесные полосы и увлажнение полей. Москва: Лесная промышленность; 1971.
10. Здорнов ИА, Марина НВ. Оценка снегонакопления и фитотоксичности талой снеговой воды в защитных лесных полосах вблизи автодорог. *Национальная ассоциация ученых*. 2015;(4-5(9)):157-61.
11. Данилов МП, Нелина НВ, Гемеджиева НГ, Кудабаяева ГМ, Веселова ПВ. Новые местонахождения инвазивных видов в Казахстане. *Промышленная ботаника*. 2024;24(3):67-71. doi.org/10.5281/zenodo.14112847
12. Bekenova ShSh, Myrzabayeva MT, Sulemenova ZSh. Distribution of invasive and quarantine weeds on agricultural regions of Kazakhstan. *Herald of Science of S Seifullin Kazakh Agro Technical University*. 2017;2(93):4-9.
13. Ситпаева ГТ, Зверев НЕ, Масалова ВА, Бабай ИВ, Набиева СВ, Эпиктетов ВГ и др. Черная книга Алматинской области. Алматы: Институт ботаники и фитоинтродукции; 2023.
14. Genovesi P, Carboneras C, Vilà M, Walton P. EU adopts innovative legislation on invasive species: a step towards a global response to biological invasions? *Biol Invasions*. 2014;17:1307-11. doi.org/10.1007/s10530-014-0817-8
15. Meyerson LA, Pauchard A, Brundu G, Carlton JT, Hierro JL, Kueffer C, et al. Moving toward global strategies for managing invasive alien species. In: Clements DR, Upadhyaya MK, Joshi S, Shrestha A, editors. *Global Plant Invasions*. London: Springer; 2022.
16. Национальный природный заповедник-музей «Улытау» [Internet]. [cited 2025 Jul 29]. Available from: <https://ulytaureserve.kz/ru/priroda-ulytau>.
17. Куприянов АН, Хрусталева ИА, Адекенов СМ, Габдуллин ЕМ. Флора Большого Улытау. Новосибирск: «Гео»; 2017.
18. Ситпаева ГТ, Чекалин СВ и др. Ассортимент и каталог древесных растений, рекомендованных для озеленения Алматы. Алматы: 2017.
19. Виноградова ЮК, Нейууд ВН, Шаррок СС. Кодекс управления инвазионными чужеродными видами растений в ботанических садах стран СНГ. Москва: 2015.
20. Флора Казахстана. Алма-Ата: АН КазССР; 1956–1966.
21. «Плантариум» [Internet]. Geneva: WHO; 2023 [cited 2025 may 30]. Available from: <https://www.plantarium.ru>
22. Бисенбаева ШМ, Мелисбек ЕК, Баймукан. Обзор мониторинга лесов в Казахстане на основе наблюдения за Землей. *Вестник ЕНУ. Серия: Химия. География. Экология*. 2024;2(147):135-49. doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149
23. Borissova Yu. Carbon sequestration assessment in Kazakhstan's forests: analytical review. *Cent Asian J Sustain Clim Res*. 2023;2(2):147-59. doi.org/10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/147-159.eng

24. Бондарев АИ, Вальдшмит ЛИ, Камкин ВА, Сулейменов НК. Руководство по выделению, оценке и управлению лесами высокой природоохранной ценности в Республике Казахстан. Астана: ПРООН; 2023.
25. Мырзалы ГЖ, Ишмуратова МЮ, Ивлев ВИ, Матвеев АН. Анализ флоры гор Улытау (Центральный Казахстан). Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География. 2014;4:45-52.
26. Kubentayev SA, Alibekov DT, Tustubayeva ShT, Kubentayeva BB. Checklist of rare plants of the flora Ulytau Region. Bull Karagand Univ «Biology Medicine Geography Series». 2024;29(4):62-69. doi.org/10.31489/2024bmg4/62-69
27. Протасов АН. Типы лесных культур Казахстана. Алма-Ата: Кайнар; 1965.
28. Хусаинова ИВ, Ситпаева ГТ, Бабай ИВ, Масалова ВА, Набиева СВ, Абдухадыр А, Зверев НЕ, Эпиктетов ВГ. Чужеродная дендрофлора Алматинской области и оценка ее инвазионности. Российский журнал биологических инвазий. 2023;16(4):118-131. doi.org/10.35885/1996-1499-16-4-118-131.
29. Aikio S, Duncan RP, Hulme PhE. Lag-phases in alien plant invasions: separating the facts from the artefacts. Oikos. 2010;119(2):370-8. doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17963.x
30. PrimeMinister.kz. Forest cover in Kazakhstan to increase to 5 million ha by 2030 – М. Myrzagaliev [Internet]. [cited 2025 July 08]. Available from: <https://primeminister.kz/en/news/elimizdin-ormandylyk-korsetkishi-2030-zhylga-karay-5-ga-deyin-ulgayady-m-myrzagaliyev-10115810>

Ұлытау өңірінің бөгде ағаш өсімдіктері: инвазиялық әлеует және натурализация жолдары

А.С. Есжанова¹, А. Абдухадыр^{*1}, В.А. Масалова¹, Г.Т. Ситпаева¹, Н.Е. Зверев¹, В.Г. Эпиктетов¹, Б.К. Билибаева¹, И.В. Бабай¹, С.В. Набиева¹, К.С. Избастина^{2,3}

¹«Ботаника және фитоинтродукция институты», Алматы, Қазақстан

²Астана ботаникалық бағы, Астана, Қазақстан

³С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

Аңдатпа. Зерттеу Орталық Қазақстан Ұлытау облысының Жаңаарқа және Ұлытау аудандарының аумағындағы бөгде ағаш-бұта түрлерінің таралуын және экологиялық бағасын зерттеуге арналған. Тақырыптың өзектілігі сыртқы әсерлерге осал дала және орманды дала экожүйелеріндегі интродукциялық түрлердің ықтимал инвазиялық қауіптілігін ерте анықтау және бағалау қажеттілігімен байланысты. Зерттеудің мақсаты аймақтың табиғи биоценоздарындағы бөгде ағаш өсімдіктерін анықтау болды. Зерттеудің міндеттеріне инвазивті түрлердің натурализация мәртебесін анықтау, олардың таралуының ықтимал көзін анықтау, таралу ауқымының агрессивтілігін бағалау, жергілікті флораға және табиғи өсімдіктер қауымдастығына инвазивті өсімдіктерді енгізу қаупін азайту жолдары кірді. Зерттеулер көрсеткендей, бұл аймақтағы бөгде дендрофлораны бағалау бұрын зерттелмеген, әсіресе натурализация дәрежесін, таралу сипатын, сонымен қатар жергілікті өсімдіктерге әсерін ескере отырып зерттелмеген. Ғылыми жаңалық-натурализация дәрежесін, таралу сипатын және жергілікті өсімдіктермен өзара әрекеттесуін ескере отырып, бұрын зерттелмеген аймақтағы

бөгде дендрофлораны кешенді бағалау. Жұмыста далалық маршруттық шолулар, таксономиялық талдау, «ТМД елдерінің ботаникалық бақтарында инвазивті бөгде өсімдіктер түрлерін басқару кодексінің» өзгертілген классификациясы негізінде инвазивтілікті бағалау шкаласы, сонымен қатар салыстырмалы флористикалық талдау әдістері қолданылады. Ұлытау өңірінде жүргізілген зерттеулер нәтижесінде негізінен орманды мелиорациялау немесе елді мекендерді абаттандыру шаралары аясында өсірілетін 21 бөгде ағаш тұқымдас таксондар анықталды. *Acer negundo*, *Populus balsamifera*, *Fraxinus americana* сияқты бөгде ағаш өсімдіктері агрессивтіліктің жоғары дәрежесін көрсетпестен (0-3 дәреже) кездейсоқ таралу үлгісін көрсететіні анықталды. Дегенмен, аналық тәждерден тыс жалғыз өркендердің болуы және кейбір таксондарда генеративті белсенділік белгілері, ықтимал инвазиялық қауіпті көрсетеді. Алынған мәліметтер Қазақстанның құрғақ аймақтарындағы ормандарды қалпына келтіру және табиғатты қорғау шараларын жоспарлауда практикалық маңызы бар.

Түйін сөздер: Ұлытау, бөгде өсімдіктер, инвазиялық дендрофлора, өсімдіктердің агрессивтілік дәрежесі

Alien woody plants in the Ulytau region: invasive potential and naturalization pathways

A.S. Yeszhanova¹, A. Abdukhadyr^{*1}, V.A. Masalova¹, G.T. Sitpayeva¹, N.E. Zverev¹, V.G. Epiktetov¹,
B.K. Bilibaeva¹, I.V. Babay¹, S.V. Nabieva¹, K.S. Izbastina^{2,3}

¹Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan

²Astana Botanical Garden, Astana, Kazakhstan

³S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan

Abstract. This study is devoted to the distribution and ecological assessment of alien tree and shrub species in the Zhanaarka and Ulytau districts of the Ulytau region in Central Kazakhstan. The relevance of the topic is due to the need for early detection and assessment of the potential invasive threat of introduced species in steppe and forest-steppe ecosystems that are vulnerable to external influences. The study aimed to identify alien woody plants in the natural biocenoses of the region. The research tasks included determining the naturalization status of invasive species, establishing the possible source of their spread, assessing the aggressiveness and scale of their spread, assessing the threat to native flora, and ways to reduce the risk of invasive plants entering natural plant communities. Research shows that the assessment of alien dendroflora in this region has not been studied before, especially with regard to the degree of naturalization, the nature of distribution, and the impact on native vegetation. The work uses field route surveys, taxonomic analysis, an invasiveness assessment scale based on a modified classification from the “Code for the Management of Invasive Alien Plant Species in Botanical Gardens of the CIS Countries,” as well as methods of comparative floristic analysis. As a result of research in the Ulytau region, 21 alien tree taxa were identified, mainly cultivated as part of forest reclamation measures or greening of settlements. It was found that alien woody plants such as *Acer negundo*, *Populus balsamifera*, and *Fraxinus americana* mainly show sporadic distribution without displaying a high degree of aggressiveness (rank 0–3). However, the presence of isolated seedlings outside the parent crowns and signs of generative activity in some taxa indicate a potential invasive threat. The data

obtained are of practical importance for planning reforestation and nature conservation measures in arid areas of Kazakhstan.

Keywords: Ulytau, alien plants, invasive dendroflora, aggressiveness ranking

References

1. Richardson DM, Pyšek P. Editorial: fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton. *Divers Distrib.* 2008;14(2):161-8. doi.org/10.1177/0309133307087089
2. Blossey B, Nötzold R. Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis. *J Ecol.* 1995;83(5):887-9. doi.org/10.2307/2261425
3. Sennikov AN, Lazkov GA. Alien plants of Kyrgyzstan: the first complete inventory, distributions and main patterns. *Plants (Basel).* 2024;13(2):286. doi.org/10.3390/plants13020286
4. Lazzaro L, Bolpagni R, Buffa G, Gentili R, Lonati M, Stinca A, et al. Impact of invasive alien plants on native plant communities and Natura 2000 habitats: state of the art, gap analysis and perspectives in Italy. *J Environ Manag.* 2020;274:111140. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111140
5. Kalisz S, Kivlin SN, Bialic-Murphy L. Allelopathy is pervasive in invasive plants. *Biol Invasions.* 2021;23:367-71. doi.org/10.1007/s10530-020-02383-6
6. Bleeker W, Schmitz U, Ristow M. Interspecific hybridisation between alien and native plant species in Germany and its consequences for native biodiversity. *Biol Conserv.* 2007;137:248-53. doi.org/10.1016/j.biocon.2007.02.004
7. Fletcher RA, Brooks RK, Lakoba VT, Sharma G, Heminger AR, Dickinson CC, et al. Invasive plants negatively impact native, but not exotic, animals. *Glob Chang Biol.* 2019;25:3694-705. doi.org/10.1111/gcb.14752
8. Sarsenova SG, Botanova ZhK. Parki i skvery goroda Almaty. 1868–1916 gg.: sbornik arhivnyh dokumentov i materialov [Parks and squares of Almaty. 1868–1916: collection of archival documents and materials]. Almaty; 2004. 140 p. [in Russian]
9. Kargov VA. Lesnye polosy i uvlazhnenie polej [Forest shelterbelts and field moisture]. Moscow: Lesnaya promyshlennost; 1971. [in Russian]
10. Zdoronov IA, Marina NV. Ocenka snegonakopleniya i fitotoksichnosti taloj snegovoj vody v zashhitnyh lesnyh polosah vblizi avtodorog [Assessment of snow accumulation and phytotoxicity of melt snow water in protective forest belts near highways]. *Nacional'naja asociaciya uchenykh [National Association of Scientists].* 2015;(4-5(9)):157-61 [in Russian].
11. Danilov MP, Nelina NV, Gemedzhieva NG, Kudabaeva GM, Veselova PV. Novye mestonahozhdeniya invazivnyh vidov v Kazakhstane [New localities of invasive species in Kazakhstan]. *Promyshlennaya botanika [Industrial Botany].* 2024;24(3):67-71. doi.org/10.5281/zenodo.14112847 [in Russian].
12. Bekenova ShSh, Myrzabayeva MT, Sulemenova ZSh. Distribution of invasive and quarantine weeds on agricultural regions of Kazakhstan. *Herald of Science of S Seifullin Kazakh Agro Technical University.* 2017;2(93):4-9.
13. Sitpaeva GT, Zverev NE, Masalova VA, Babai IV, Nabieva SV, Epiktetov VG, et al. Chernaya kniga Almatinskoy oblasti [Black book of Almaty region]. Almaty: Institute of Botany and Phytointroduction; 2023. [in Russian]
14. Genovesi P, Carboneras C, Vilà M, Walton P. EU adopts innovative legislation on invasive species: a step towards a global response to biological invasions? *Biol Invasions.* 2015;17:1307-11. doi.org/10.1007/s10530-014-0817-8

15. Meyerson LA, Pauchard A, Brundu G, Carlton JT, Hierro JL, Kueffer C, et al. Moving toward global strategies for managing invasive alien species. In: Clements DR, Upadhyaya MK, Joshi S, Shrestha A, editors. *Global Plant Invasions*. London: Springer; 2022.
16. Nacionalnyj prirodnyj zapovednik-muzej «Ulytau» [Ulytau State Nature Reserve-Museum] [Internet]. [cited 2025 Jul 29]. Available from: <https://ulytaureserve.kz/ru/priroda-ulytau>. [in Russian]
17. Kupriyanov AN, Khrustaleva IA, Adekenov SM, Gabdullin EM. *Flora Bolshogo Ulytau* [Flora of the Great Ulytau]. Novosibirsk: «Geo»; 2017. [in Russian]
18. Sitpaeva GT, Chekalin SV, et al. Assortiment i katalog drevesnyh rastenij, rekomendovannyh dlja ozelenenija Almaty [Assortment and catalogue of woody plants recommended for landscaping Almaty]. Almaty; 2017. [in Russian]
19. Vinogradova YuK, Heywood VH, Sharrock SS. Kodeks upravlenija invazionnymi chuzherodnymi vidami rastenij v botanicheskikh sadah stran SNG [Code of conduct on alien invasive plants in botanic gardens of CIS countries]. Moscow; 2015. [in Russian]
20. *Flora Kazahstana* [Flora of Kazakhstan]. Alma-Ata: AN KazSSR; 1956–1966. [in Russian]
21. Plantarium [Internet]. Geneva: WHO; 2023 [cited 2025 may 30]. Available from: <https://www.plantarium.ru>
22. Bisenbaeva ShM, Melisbek EK, Bajmukan. Obzor monitoringa lesov v Kazahstane na osnove nabljudenija za Zemlej [Review of forest monitoring in Kazakhstan based on Earth observation]. Vestnik ENU. Seriya Himiya. Geografiya. Ekologiya. 2024;2(147):135-49. doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149 [in Russian]
23. Borissova Yu. Carbon sequestration assessment in Kazakhstan's forests: analytical review. Cent Asian J Sustain Clim Res. 2023;2(2):147-59. doi.org/10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/147-159.eng
24. Bondarev AI, Valdshmit LI, Kamkin VA, Sulejmenov NK. Rukovodstvo po vydeleniju, ocenke i upravleniju lesami vysokoj prirodoohrannoju cennosti v Respublike Kazahstan [Guidelines for identification, assessment and management of high conservation value forests in the Republic of Kazakhstan]. Astana: UNDP; 2023.
25. Myrzaly GZh, Ishmuratova MYu, Ivlev VI, Matveev AN. Analiz flory gor Ulytau (Centralnyj Kazahstan) [Analysis of the flora of the Ulytau Mountains (Central Kazakhstan)]. Bull Karagand Univ «Biology Medicine Geography Series». 2014;4:45-52. [in Russian]
26. Kubentayev SA, Alibekov DT, Tustubayeva ShT, Kubentayeva BB. Checklist of rare plants of the flora Ulytau Region. Bull Karagand Univ «Biology Medicine Geography Series». 2024;29(4):62-69. doi.org/10.31489/2024bmg4/62-69
27. Protasov AN. Tipy lesnyh kultur Kazahstana [Types of forest plantations of Kazakhstan]. Alma-Ata: Kajnar; 1965. [in Russian]
28. Khussainova IV, Sitpayeva GT, Babay IV, Masalova VA, Nabyeva SV, Abdukhadyr A, Zverev NE, Epiktetov VG. Chuzherodnaja dendroflora Almatinskoj oblasti i ocenka ee invazionnosti [Alien dendroflora of the Almaty region and assessment of its invasiveness]. Rossijskij zhurnal biologicheskikh invazij [Russian Journal of Biological Invasions]. 2023;16(4):118-31. doi.org/10.35885/1996-1499-16-4-118-131 [in Russian].
29. Aikio S, Duncan RP, Hulme PhE. Lag-phases in alien plant invasions: separating the facts from the artefacts. Oikos. 2010;119(2):370-8. doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17963.x
30. PrimeMinister.kz. Forest cover in Kazakhstan to increase to 5 million ha by 2030 – M. Myrzagaliev [Internet]. [cited 2025 July 08]. Available from: <https://primeminister.kz/en/news/elimizdin-ormandylyk-korsetkishi-2030-zhylga-karay-5-ga-deyin-ulgayady-m-myrzagaliev-10115810>

Сведения об авторах:

Есжанова Айнур Сериковна – заведующая лабораторией дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Абдухадыр Айнагуль – автор-корреспондент, PhD-докторант КазНУ им. аль-Фараби. Научный сотрудник лабораторий дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Масалова Велта Аркадьевна – старший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Ситпаева Гульнара Токбергеновна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Зверев Николай Евгеньевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Эпиктетов Владимир Геннадьевич – старший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Билибаева Ботагоз Курманбековна – младший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Бабай Инга Валерьевна – старший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Набиева Светлана Вячеславовна – старший научный сотрудник лаборатории дендрологии, Институт ботаники и фитоинтродукции, ул. Тимирязева, 36 д, 050000, Алматы, Казахстан.

Избастина Клара Сержановна – PhD, ассоциированный профессор, «Астанинский ботанический сад» филиал РГП на ПХВ «Институт ботаники и фитоинтродукции» Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина, просп. Женис, 62, 010000, Астана, Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Есжанова Айнур Сериковна – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының меңгерушісі, аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Абдухадыр Айнагуль – хат-хабар авторы, Эл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дің PhD докторанты. Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Масалова Велта Аркадьевна – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Ситпаева Гульнара Токбергеновна – биология ғылымдарының докторы, Ботаника және фитоинтродукция институтының бас директоры, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Зверев Николай Евгеньевич – биология ғылымдарының кандидаты, Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Эпиктетов Владимир Геннадьевич – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Билибаева Ботагоз Курманбековна – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Бабай Инга Валерьевна – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Набиева Светлана Вячеславовна – Ботаника және фитоинтродукция институты, дендрология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Тимирязев көшесі 36, 050000, Алматы, Қазақстан.

Избастина Клара Сержанқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан Республикасы экология және табиғи ресурстар министрлігі, Орман шаруашылығы және жануарлар дүниесі комитетінің «Ботаника және фитоинтродукция институты ШЖҚ РМК филиалы «Астана ботаникалық бағы», С.Сейфуллин атындағы Қазақ Агротехникалық Зерттеу Университеті, Жеңіс даңғылы 62, 010000, Астана, Қазақстан.

Authors' information:

Yeszhanova Ainur – Head of the Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Abdukhadyr Ainagul – corresponding author, PhD student, Kazakh National University named Al-Farabi. Researcher, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Massalova Velta – Senior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Sitpayeva Gulnara – Doctor of biological sciences, General Director of the Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Zverev Nikolaj – Candidate of biological sciences, Senior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Epiktetov Vladimir – Senior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Bilybaeva Botagoz – junior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Babay Inga – Senior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Svetlana Nabyeva – Senior research, Laboratory of Dendrology, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev street 36 d, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Izbastina Klara – PhD, Associate Professor RSE on the REM “Astana Botanical Garden” Committee of Forestry and Animal World of the Ministry of Ecology and Nature Conservation, S. Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University, Zhenis avenue 62, 010000, Astana, Kazakhstan.



IRSTI 34.35.33
Research article

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-147-165>

Biological and socioeconomic implications of seawater intrusion on coastal agroecosystems

I.A. Bozdar¹, R. Ahmed¹, A.B. Chachar^{*1}, R.N. Malano¹, H. Magsi¹, A.A. Mahesar¹

¹Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Social Sciences, Sindh Agriculture University, Tandojam, Pakistan

Abstract. Seawater intrusion (SWI) has emerged as a critical environmental and socioeconomic challenge in the coastal belt of Badin District, Pakistan. This study investigates the impacts of SWI on rural livelihoods, food security, and migration through household surveys and socioeconomic profiling. Findings reveal that agriculture remains the dominant livelihood, engaging 55% of respondents, yet declining freshwater availability and salinization have degraded nearly 22% of cultivated land, reducing crop productivity and livestock resources. Average monthly household income (Rs. 17,042) barely exceeds expenditures (Rs. 16,072), leaving families highly vulnerable to food insecurity. Poor infrastructure, limited access to healthcare and safe water, and exploitative credit systems further exacerbate poverty. Natural hazards, including floods, unseasonal rains, and storms, compound the impacts of SWI, while the malfunctioning Left Bank Outfall Drain (LBOD) has intensified land degradation and crop loss. Consequently, migration has become an adaptive strategy, with over 100 households relocating from affected union councils due to declining agricultural opportunities. The study underscores that SWI is not only an ecological issue but also a driver of socioeconomic instability, poverty, and rural–urban migration. Urgent policy interventions such as regulated freshwater releases downstream of Kotri Barrage, rehabilitation of LBOD, embankment reinforcement, and stricter industrial effluent management are essential to mitigate SWI impacts and safeguard food security. These findings highlight the pressing need to integrate climate adaptation, sustainable water management, and community resilience into national strategies for coastal development.

Keywords: seawater intrusion, food security, coastal livelihoods, land degradation, district Badin, Sindh

Introduction

Seawater intrusion (SWI) is a growing environmental challenge in coastal regions worldwide, posing serious risks to human health, agricultural productivity, and sustainable economic

Received: 21.09.2025. Accepted: 30.09.2025. Available online: 30.09.2025.

*Corresponding author: abdulbasit.mk678@gmail.com

development [1,2]. The problem is intensified by climate change, unsustainable agricultural practices, and over-extraction of groundwater, which disrupts the freshwater-saltwater balance and degrades soil and water resources [3–6]. As a result, SWI reduces freshwater availability, contaminates aquifers, and undermines food production in many vulnerable regions. Coastal communities in developing countries are particularly exposed due to their heavy dependence on natural resources [7,8]. In Pakistan's Sindh province, Badin district provides a striking case where agriculture, supporting over 70% of the population, faces increasing stress from salinity intrusion and rising temperatures. Productive farmland has been degraded, crop yields have declined, and food insecurity has intensified as household incomes drop [9,10].

Food security, which includes the dimensions of availability, access, utilization, and stability [11–13], is directly threatened in SWI-affected areas. Salinization reduces agricultural output and food availability, while inflation and unemployment constrain household access to food [14–16]. These pressures are compounded by poor education, weak market access, and limited livelihood opportunities, which reinforce chronic poverty and vulnerability.

The Sindh coastal belt, stretching across Badin and Thatta, illustrates these interlinked challenges. Freshwater flow downstream of Kotri Barrage has sharply declined from 400 million tons of nutrient-rich silt annually to nearly 100 million tons, leading to severe salinity intrusion and hyper-saline conditions (40–50 ppt compared to 15–20 ppt a few decades ago) [17]. Badin, one of the most hazard-prone districts, has been repeatedly affected by cyclones, floods, droughts, and heavy rains, leaving communities with degraded land, contaminated water, and weakened livelihoods [18]. The consequences are profound: nearly 1.2 million acres of farmland in Sindh have been rendered unproductive, aquifers have been contaminated, and rural households face migration, indebtedness, and increased exposure to waterborne diseases such as malaria and cholera [19]. Women and children are disproportionately affected, as freshwater scarcity increases the burden of labor, reinforcing poverty and inequality [20,21].

Against this backdrop, the present study investigates the socioeconomic impacts of seawater intrusion on livelihoods, infrastructure, and food security in the coastal belt of Sindh, with particular focus on Badin and Shaheed Fazil Rahoo Talukas. By analyzing household conditions, economic activities, and social vulnerabilities, this research seeks to provide evidence-based insights for designing adaptive strategies and policy interventions aimed at strengthening food security and resilience in Pakistan's coastal communities.

Materials and research methods

Research Design

The study adopted a mixed-methods approach, integrating both quantitative and qualitative techniques to comprehensively analyze the socioeconomic effects of seawater intrusion on food security and rural livelihoods. Primary and secondary sources of information were utilized to strengthen the validity and reliability of the findings.

Study Area and Sampling

The research was conducted in District Badin, Sindh, one of the most severely affected regions by seawater intrusion. Two talukas were purposively selected based on their exposure to salinity and livelihood dependency on agriculture and fisheries. From each taluka, two union

councils (UCs) were selected, and 14 households from each UC were surveyed using a stratified random sampling method, resulting in a total of 56 respondents.

Data Collection

Primary Data

Primary data were collected through structured questionnaires, key informant interviews (KIIs), and focus group discussions (FGDs). The pretested questionnaire (Annexure 1) included modules on household demographics, income and expenditure, agriculture, health, education, migration, assets, and the effects of seawater intrusion on livelihoods and food security. KIIs were conducted with community leaders, government officials, and NGO representatives, while FGDs were organized to capture community perspectives and triangulate findings.

Secondary Data

Secondary data were obtained from published reports, government records, academic literature, and documents from relevant organizations such as the Government of Sindh, International Union for Conservation of Nature (IUCN), Worldwide Fund for Nature (WWF-P), UN agencies, Asian Development Bank (ADB), and NGOs including Pakistan Fisherfolk Forum (PFF) and Rural Support Programmers (RSPs). These sources were used to develop a socioeconomic profile of the area and contextualize the impact of seawater intrusion in relation to past natural disasters and climatic variations.

Socioeconomic Indicators

Socioeconomic characteristics of respondents were examined to assess their influence on household vulnerability and food insecurity. Key indicators included family size, education, household income, access to health facilities, food and non-food expenditures, housing, agriculture and non-agricultural occupations, water supply, and sanitation.

Data Analysis

Quantitative data were entered in Microsoft Excel and analyzed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS). Descriptive and inferential statistics were applied

Results

District Badin

The district derives its name from the headquarters town of Badin. District Badin is spread over a geographical area of 6,726 square kilometers. The district is administratively divided into 5 talukas, 46 union councils, and 511 dehs. Two talukas of Badin district (Badin and Shaheed Fazil Rahoo) are coastal, being geographically located on the eastern periphery of Sir Creek.

Table 1

Taluka-wise geographic area of the district Badin

S. No.	Name of Taluka	Area in (sq km)
1	Badin	1763.200
2	Matli	1056.480

3	Shaheed Fazil Rahoo	1572.340
4	Talhar	804.127
5	Tando Bago	1513.640

Badin Taluka occupies the largest area (1,763 km²), followed by Shaheed Fazil Rahoo (1,572 km²). Together, these two coastal Talukas represent nearly 49 % of the district's total area (Table 1). Their economies are highly vulnerable due to the degradation of natural resources such as land, water, and forestry.

Infrastructural Damages

Frequent natural disasters and reduced Indus River flows have facilitated significant seawater intrusion reported up to 30-50 km inland. A 2001 survey by the Sindh Irrigation and Power Department and the Board of Revenue found that in the Badin and Shaheed Fazil Rahoo Talukas, 10 dehs (35,785 acres) were completely eroded and 22 dehs (44,046 acres) were partially affected by seawater [22].

Table 2

Land degradation due to Seawater intrusion in Badin

Taluka	Total Dehs	Total Area (acres)	Dehs Fully Eroded (acres)	Dehs Partially Affected (acres)	Total Area Affected (acres)
Shaheed Fazil Rahoo	102	440,504	1 (6,772)	5 (23,853)	30,625
Badin	140	352,681	4 (28,986)	6 (20,193)	49,179
Total	242	793,185	5 (35,758)	11 (44,046)	79,804

Socio-Economic Characteristics of Respondents

Demographic Profile

Table 3 presents the descriptive socioeconomic characteristics of the respondents. The average age of respondents was 40.78 years (SD = 12.72), with a minimum of 20 years and a maximum of 65 years. The average household size was relatively large, with 10.85 members per family, ranging from 2 to 30 members. On average, households comprised 5.19 male members (range: 1–14) and 5.66 female members (range: 1–16), indicating a slightly higher proportion of females compared to males. The number of working members in each household was limited, averaging only 2.19 members (range: 1–5). Thus, a relatively greater ratio of female members was noted as compared to male members in our research study area.

Table 3

Descriptive socioeconomic characteristics of the respondents

Family size	Average	Minimum	Maximum
Age	40.78	20	65

Total family members	10.85	2	30
Male in Household	5.19	1	14
Female in Household	5.66	1	16
Working member in HH	2.19	1	5

Education

Education is considered as most important indicator for the socio-economic development of any society. It is commonly believed that through the literacy ratio of any community, we understand the social structure of that society. Results in the above figure (Figures 1 and 2) reveal that the education level of respondents was recorded as 10.71% Bachelors (B.A. and B.Sc.), 10.71% were intermediate, 12.5% were matriculation, 23.21% primary, and 42.86% of respondents were illiterate in the study area.

Housing features

In rural areas, housing features reflect the economic dynamics of households with respect to rural development. In this research, it is recorded that (Figure 1a and b) about 77% households were dwelling in wood-made houses in our study area, where 12% people were living in semi-kacha houses, while the rest, 5% in kacha houses, 4% in pacca homes, and 2% people were residing in Jhopra houses.

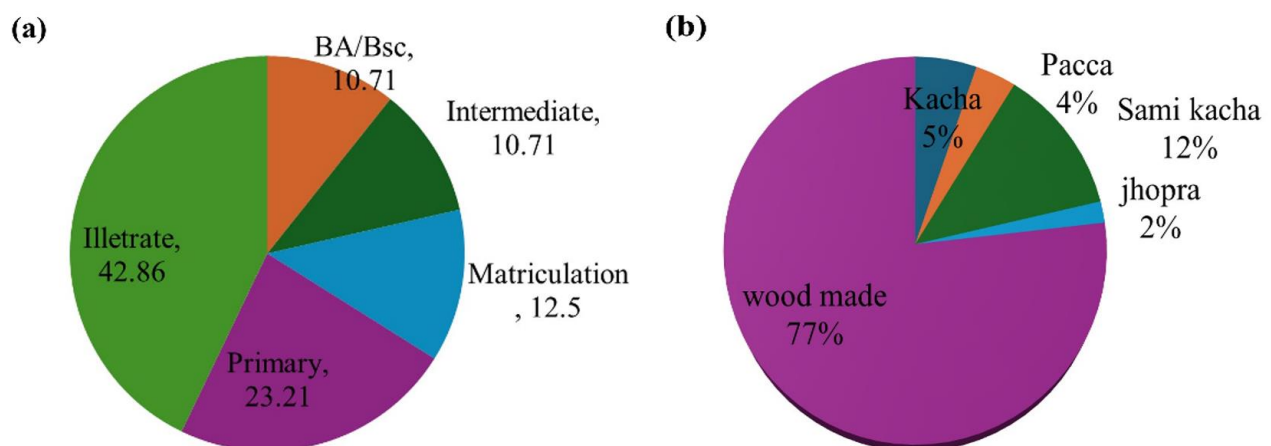


Figure 1. (a) Literacy ratio of respondents in percentage, **(b)** Household classification

Main sources of income

During the research study, it was noted that (Table 4) the coastal area peoples' livelihoods were mainly dependent on agriculture and livestock. In fact, fishing, wage labor, government employment, and small-scale private business were partially sources of their income of study area peoples. The Average/percentage households' sources of income were agriculture 55.36 (55.83%), livestock 18.93 (19%), fishing 3.21 (3%), wage labor 10.71 (11%), government employee 10 (10%), and 1.78 (2%) people used to do their own business.

Table 4**Primary and secondary Sources of income**

Sources	Percentage
Agriculture	46
Livestock	16
Fishing	3
Wage Labor	9
Government Employer	24
Business	2

Monthly income of respondents

It was revealed that respondents relied primarily on agriculture and livestock as their major sources of income, while other livelihood options such as fishing, wage labor, government employment, and small-scale business played a relatively minor role (Table 5). Among all income sources, agriculture contributed the highest share, with an average monthly income of Rs. 9,412, ranging widely from Rs. 833 to Rs. 70,000. Livestock followed, contributing an average of Rs. 2,275 per month. In contrast, fishing and wage labor generated relatively lower returns, averaging Rs. 437 and Rs. 1,223 per month, respectively. Income from government employment stood at Rs. 3,428 per month, while business activities contributed the least, with only Rs. 267 per month on average. These results highlight that agriculture remains the economic backbone of the study area. However, the heavy dependence on low-return sectors such as wage labor and fishing, coupled with minimal earnings from private business, reflects limited livelihood diversification and weak entrepreneurial development, thereby exposing coastal households to greater socioeconomic vulnerability.

Table 5**Monthly income of respondents**

Sources	Average	Minimum	Maximum
Agriculture	6500	833	70000
Livestock	2275	300	15000
Fishing	437	2500	15000
Wage labor	1223	1000	10000
Government Employee	3428	9000	25000
Business	267	1500	12000

Land holding and its use pattern

Pakistan is primarily an agricultural country, and rural communities largely depend on farming for their livelihoods. In the study area, the majority of households were engaged in land cultivation, making agriculture the dominant economic activity. The findings (Table 6) show that, on average, households cultivated 25.47 acres (69%) out of a total 36.73 acres (100%)

of landholding. However, approximately 7.92 acres (22%) of agricultural land have been lost due to seawater intrusion, while an additional 3.33 acres (9%) remained fallow for various reasons, such as lack of inputs, irrigation issues, or salinity problems. The landholding size varied considerably among respondents, ranging from a minimum of 2 acres to a maximum of 200 acres per household.

Table 6

Land use pattern

Description	Average	Minimum	Maximum	S.D
Total farm size	36.73	2	200	32.11
Cultivated	25.47	2	120	21.86
Fallow land	3.33	1	30	8.74
Seawater effected	7.92	6	80	13.64

Tenancy status

Field observations (Figure 2) revealed that the majority of respondents (76%) owned agricultural land, which served as their primary source of income. In contrast, approximately 20% of households were tenants cultivating land on lease, while a smaller proportion (4%) shared their land with neighbors either on a rental basis or under fixed-term contractual arrangements.

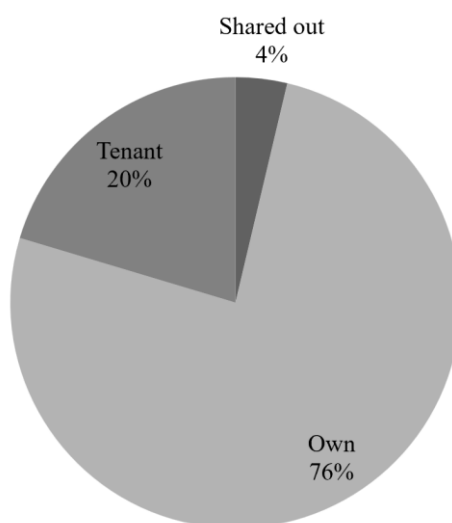
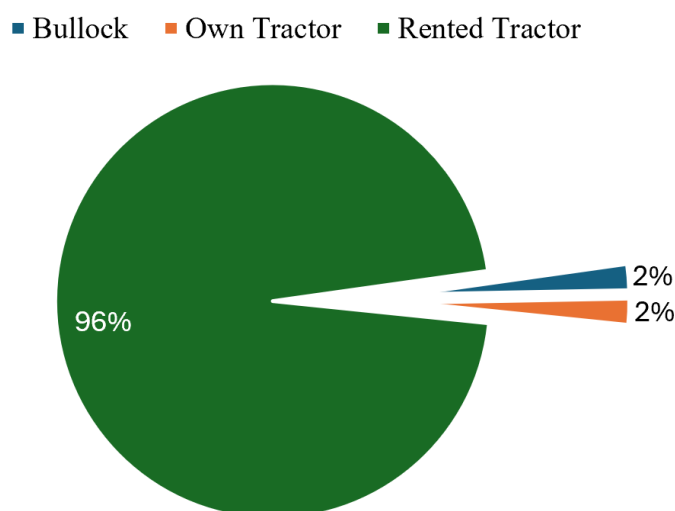


Figure 2. Tenancy status

Power sources

In rural areas of Pakistan, tractors have largely replaced bullocks as the primary source of power for agricultural activities. Traditionally, bullocks played a vital role in conventional farming systems, particularly for tillage and transportation. However, in the study area, the results (Figure 3) show that 96% of households cultivated their land using rented tractors, while only 2% owned tractors or relied on bullocks for land preparation and cultivation purposes.

**Figure 3.** Power sources*Animals kept by households*

Livestock plays a crucial role in the national economy, contributing 53.2% to agricultural value added and 11.4% to the national GDP during 2009–10 (GOP, 2013; SCCDP, 2012). Findings from the field survey (Table 7) indicate that, in the study area, households owned on average 2.32 sheep/goats and a similar number of buffaloes. The average number of cows was 1.82 per household, while the presence of bullocks and donkeys was negligible (0.01 each on average). The number of livestock per household varied widely, ranging from a minimum of 1 to a maximum of 20 animals.

Table 7**Animals per household**

Sources	Average	Minimum	Maximum	S.D
Sheep/Goat	2.32	1	15	7.92
Buffalos	2.37	1	15	8.32
Cow	1.82	1	20	7.55
Bullock	0.01	1	2	7.55
Donkey	0.01	1	1	7.55

Budget and expenditure

The analysis of household budgets provides insights into the income utilization patterns and socio-economic priorities of rural families in the study area. Results show that food was the dominant expenditure head, accounting for the majority of household spending. On average, 67% of total income was allocated to food items, leaving a relatively smaller share for education, health, utilities, and other needs. Apart from food, significant expenditures were also made on clothing, land preparation, and agricultural inputs such as fertilizers, insecticides, and seeds. Less frequent but important expenditures included the purchase of agricultural implements,

livestock, and house construction. Details of household major expenditures are presented in Table 8.

Table 8

Household major Expenditures in general items

Particulars	Frequency	Ranking
Food	56	1
Clothing	56	1
Land Preparation	51	2
Fertilizer/Insecticide/Seed	50	3
Agriculture Implements	40	4
Animal Purchasing	1	5
House Construction	1	5

A more detailed breakdown of monthly expenditure indicates that the average household spent Rs. 7,830.42 on food, Rs. 912.50 on education, and Rs. 767.85 on mobile communication. Expenditure on health care averaged Rs. 558.92, while ceremonies and social functions accounted for Rs. 730.35 per month. Expenditure on animal feeding (Rs. 428.57), utilities (Rs. 303.57), travel (Rs. 502.85), and washing (Rs. 424.10) were also recorded. Non-essential expenses, including junk food (Rs. 502.85) and smoking-related items, were observed in several households. The details are summarized in Table 9.

Table 9

Household Food and Non-Food Expenditures per Month in Rupees

Particulars	Average	Minimum	Maximum	S.D
Food	7830.4	3000	20000	4071.91
Education	912.5	200	6000	1405.1
Utility	303.57	200	2000	434.64
Health	558.92	200	2000	402.31
Junky	502.85	300	3000	699.09
Ceremonies	730.35	500	2000	731.01
feeding	428.57	500	10000	1723.52
Drinking Water	0.11	500	500	9292
Mobile	767.85	200	5000	913.19
Travelling	502.85	720	3000	950.91
washing	424.1	100	1500	236.53

Household Assets

The distribution of major household assets among the respondents. Electrical assets form the largest share, accounting for 41 percent of total possessions, reflecting the importance of

appliances such as fans, televisions, and other electronic equipment in daily life. Motorcycles follow with 30 percent, indicating their role as a primary and affordable means of transportation. Weapons make up 13 percent, suggesting that many households keep arms for protection or cultural reasons. Jewelry represents 7 percent, serving both as an adornment and a form of savings. Freezers account for 6 percent, highlighting limited cold-storage capacity, while motor cars and tractors are least common, at only 2 percent and 1 percent respectively, showing minimal ownership of high-value transport and agricultural machinery. Overall, the data reveal a strong preference for practical assets that support mobility and household functionality, with comparatively low investment in larger or more capital-intensive equipment (Figure 4).

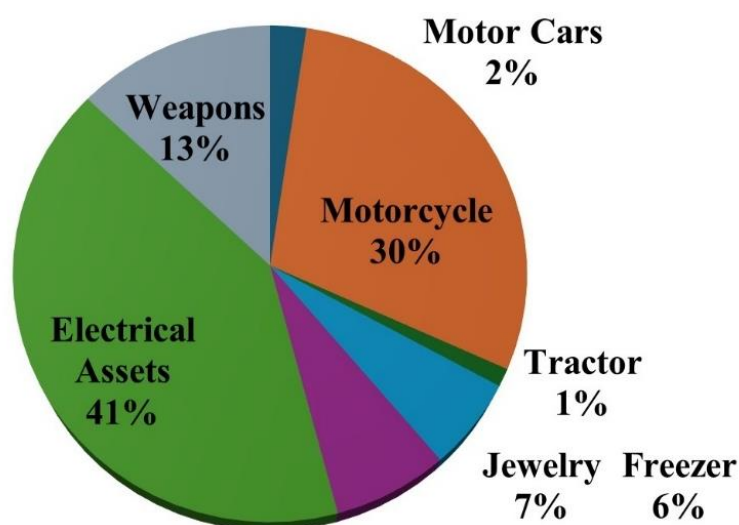


Figure 4. Household & agricultural assets possessed by respondents
Basic amenities available to the households

Households were also asked to share their opinion about whether they are availing basic facilities of life provided by the government. In response, most respondents reported that shops and roads were available and ranked them first (Table 10). Moreover, the School ranked as 2nd, Public transport as 3rd, Electricity as 4th, and Health center facilities on 5th ranking.

Table 10

Available basic facilities in the study area

Facilities	Percentage	Frequency out of 56	Ranking
Shop	73.21	41	1
Road	73.21	41	1
School	69.64	39	2
Public transport	66.07	37	3
Electricity	62.5	35	4
Health center	12.5	7	5

Loaning and credit facilities availed by the respondents

One proverb is popular in our society for the farming community is “Born in debt, lives in debt, and dies in debt.” This is a clear and pour picture of our country's farmer community. In this regard, the respondents were asked to provide data on the credit sources, where in response of the question, it is accounted that about 64% of respondents take loans from shopkeepers, 23% household from land lard, 9% from relatives, and 4% household depend on their friends (Figure 5). They were further asked that why percent of interest (commission) those lenders are demanding when you take loans from them, thus the response was 10% to 35% per year.

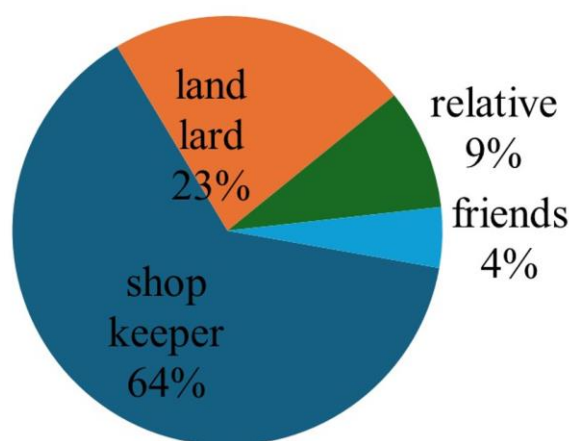


Figure 5. Credit facilities acquired by the respondents

Sea water intrusion impacts and food security challenges

This section is comprised over climate change impacts (in particular seawater intrusion) on rural poverty, migration of the local population, and food security challenges. Therefore, this study was designed to investigate that whether seawater intrusion in the coastal belts of Badin District is causing food insecurity and rural unrest in the study area.

Opinions on Climate Change

Respondents were asked specific questions regarding resource degradation and its perceived impacts on their livelihoods. The findings (Table 11) show that seawater intrusion and unseasonal rains were identified as the most destructive factors, reported by more than 50 respondents and ranked first. Storms were ranked second, followed by rural migration (third), high temperature (fourth), and heavy rainfall (fifth).

Table 11

Recent changes in the climatic felt by the respondents

Categories	Frequency	Ranking
Seawater intrusion increased	54	1
Unseasonal rain	54	1

Storm	45	2
Rural migration	40	3
High temperature	38	4
High Rain	19	5

Major issues and challenges faced by the respondents in the study area

Food is a fundamental human need, yet food insecurity has become one of the most pressing challenges in Pakistan, particularly in disaster-prone regions. The district of Badin has faced six major natural disasters in recent years, which have severely affected the livelihoods of its population. In this study, respondents were asked to identify the main issues contributing to food insecurity in the region. Their responses were summarized in Table 12. Results in Table 12 expose that natural disasters remained the main causes of food supply and lower agricultural and livestock productivity, followed by seawater intrusion, which has transformed agricultural lands into barren and water-logged lands. Badin, being in lower repine, there is unavailability of fresh water, which is ranked as 3rd and is pointed out by 45 respondents. Besides that, unemployment is also highlighted and ranked as 4th, which has lowered the income of the local population and caused starvation among many families, which is of course the result of a low level of education among them. Some of the households also signaled that in rainy seasons, the Left Bank Out-fall Drain (LBOD) has flowed inversely (from tell to head) and caused floods to local communities of Badin, which has not only washed their resources but also forced the local population to migrate from the region. A few of the households have also highlighted that food supply is in efficient in the region because of poor infrastructure and high prices of the food items.

Table 12

Main issues faced by the respondents in Badin and Shaheed Fazil Rahoo Talukas

Categories	Frequency	Ranking
Natural disaster	56	1
Seawater intrusion	51	2
Fresh water	45	3
Unemployment	37	4
Education	37	4
LBOD	27	5
High prices of food items	19	7
Infrastructure	19	7

Discussion

The findings of this research clearly indicate that seawater intrusion (SWI) is a major driver of rural poverty, food insecurity, and migration in the coastal belt of Badin District. The illiteracy rate in the study area was recorded at approximately 43 percent, which is lower than the national literacy level of around 50 percent [23]. With more than half of the respondents (55%)

engaged in agriculture and 19 percent in livestock rearing, it is evident that agriculture remains the backbone of the local economy. However, the average monthly household income was only Rs. 17,042, reflecting limited economic opportunities. Landholding patterns further reinforce inequality; although the average household owned 36 acres of land, with holdings ranging between 2 and 200 acres, this distribution is highly skewed. As highlighted by Hashmi [24], nearly 80 percent of agricultural land in Pakistan is controlled by just 5 percent of landlords, leaving smallholders and tenants highly vulnerable. In the study area, 76 percent of respondents reported owning land, while 20 percent were tenants.

The analysis also revealed the weak infrastructure and limited access to social services in coastal communities. Most households lived in wooden houses (77%) with an average household size of ten members. While basic facilities such as roads, schools, public transport, electricity, and shops were available in some villages, access to healthcare centers, drainage, and water supply systems remained inadequate [22]. To sustain livelihoods, 96 percent of respondents relied on rented tractors for cultivation. Livestock assets were minimal, averaging two goats/buffaloes and one cow per household. A critical challenge observed was the degradation of natural resources due to seawater intrusion. Approximately 22 percent of cultivated land had become degraded and barren because of rising salinity and waterlogging. This has directly reduced crop productivity, undermined the food supply, and pushed households deeper into poverty. Since agriculture is the dominant livelihood, the decline in cultivable land translates into lower incomes and higher levels of unemployment. Consequently, rural households are increasingly dependent on credit, primarily obtained from shopkeepers (64%) and landlords, often at exploitative terms.

The impacts of seawater intrusion are compounded by recurrent natural disasters such as floods, storms, and heavy rains. Respondents identified SWI, unseasonal rains, and storms as their primary sources of unrest, noting that these hazards not only destroy crops but also damage infrastructure and homes. Natural disasters were ranked as the leading cause of food insecurity, followed by seawater intrusion and lack of freshwater availability. The Left Bank Outfall Drain (LBOD) was highlighted as another critical challenge. Initially designed to lower the water table and salinity in upper Sindh, the project failed due to flawed design and frequent natural disasters. Instead of draining into the sea, brackish water accumulated in agricultural fields and water bodies of Badin, leading to widespread land degradation and crop losses. In 2003, the failure of LBOD caused the destruction of millions of acres of cultivated land. Even today, during floods, the drain continues to overflow, causing extensive damage in the district. Nearly 50 percent of respondents considered LBOD to be one of the most pressing problems in the region.

The socioeconomic implications of these environmental and infrastructural challenges are severe. Households reported an average monthly expenditure of Rs. 16,072, mostly on food (67%). Limited income opportunities, coupled with high expenditures, leave families with little scope for savings. In fact, food insecurity is escalating in Badin's coastal belt due to the unavailability of freshwater, degraded land resources, and rising food prices. Similar to other food-insecure regions such as Tharparkar, households in Badin are increasingly unable to meet their nutritional needs [25]. Migration is becoming a coping strategy; the study documented that 117 households had already migrated from just four union councils of Badin and Shaheed Fazil Rahoo talukas due to declining agricultural opportunities and lack of basic amenities. This trend poses alarming implications for rural stability, as migration disrupts social networks, increases urban poverty, and exerts pressure on urban infrastructure.

The study also underscores the larger context of climate change. Pakistan's agrarian economy is highly sensitive to rainfall variability, temperature fluctuations, and monsoon patterns. Seawater intrusion, unseasonal rainfall, and heatwaves collectively threaten agricultural production, livestock, forestry, and overall food security [26]. Previous studies suggest that simulation models, statistical approaches, land-use change analyses, and agro-climatic indicators can be used to assess and predict these impacts [27]. In this context, the challenges faced by Badin reflect broader national vulnerabilities to climate change and environmental degradation. Based on community feedback, several recommendations emerged for the sustainable development of the coastal belt of Badin. These include ensuring the release of sufficient freshwater downstream of Kotri Barrage, effective management and redesign of the LBOD system, reinforcement of embankments with stone pitching to prevent seawater intrusion, and stricter regulation of industrial effluents such as wastewater from sugar mills. Respondents emphasized that without urgent interventions, the combined effects of seawater intrusion, natural disasters, and poor resource management would continue to exacerbate poverty, migration, and food insecurity in the region.

Conclusion

This study demonstrates that seawater intrusion has critically undermined the socioeconomic fabric and food security of coastal communities in Badin. Agriculture remains the primary livelihood, with more than half of households engaged in farming and one-fifth in livestock rearing; however, 22% of cultivable land has been degraded by seawater intrusion, forcing many households to abandon farming or migrate. Livestock ownership remains modest (about two goats/sheep, two buffaloes, and one to two cows per household), yet feed scarcity due to salinity further limits productivity.

Households reported low literacy (43%), high dependence on rented machinery (96%), and limited incomes averaging Rs. 17,042 per month, barely sufficient to meet expenditures. Housing conditions are poor, with the majority (77%) living in wood-made houses, and the average household size is large (10 members). Migration of 117 households from four union councils illustrates the increasing unviability of farming-based livelihoods. Overall, seawater intrusion, coupled with poor water management and inadequate infrastructure, is driving poverty, livelihood insecurity, and food shortages in Badin. Without immediate interventions such as the release of freshwater downstream of Kotri, improved management of the Left Bank Outfall Drain, and protective embankments, food security and rural livelihoods in the coastal belt will remain under severe threat.

Author Contributions

I.A.B.: Conceived the study, contributed to the research design, and led the manuscript drafting. **R.A.:** Assisted in data analysis, provided critical revisions to the manuscript, and contributed to the interpretation of results. **A.B.C.:** Coordinated fieldwork, including participant surveys and interviews, and contributed to the analysis of socioeconomic impacts. **R.N.M.:** Contributed to data collection and analysis, focusing on environmental and land degradation aspects. **H.M.:** Assisted in literature review, data interpretation, and the discussion of findings on migration and food security. **A.A.M.:** Contributed to fieldwork logistics, survey coordination, and manuscript revision.

Funding

There is no funding.

Acknowledgments

We would like to express our sincere gratitude to all the respondents in the Badin District for their valuable time and participation in this study. We especially thank the Department of Agricultural Economics for their financial and logistical support. We also extend our appreciation to the local authorities, community leaders, and field assistants whose cooperation made data collection possible.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no competing interests

Compliance with ethical standards

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper. All research involving human participants was conducted in accordance with ethical guidelines and was approved by the relevant local authorities. Informed consent was obtained from all participants, and their anonymity was maintained throughout the study. Data collection was carried out with full consideration of the participants' rights and welfare.

References

1. Yang H, Sun H, Liu T, et al. Characterization of seawater intrusion based on machine learning and implications for offshore management under shared socioeconomic paths. *J Hydrol.* 2023;623:129862. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129862
2. Butt MN, Shah SK, Yahya FA. Caregivers at the frontline of addressing the climate crisis. *Gender Dev.* 2020;28(3):479–498. doi.org/10.1080/13552074.2020.1833482
3. Sharif Uzzaman M, Islam MR. Impacts of salinity intrusion on agriculture in the coastal region of Bangladesh. *J Coast Conserv.* 2024;28(6):79. doi.org/10.1007/s11852-024-01073-y
4. Talukder B, Schubert J, Tofighi M., et al. Complex adaptive systems-based framework for modeling the health impacts of climate. *J Clim Chang Health.* 2024;15:100292. doi:10.1016/j.joclim.2023.100292
5. Ding Z, Koriem MA, Ibrahim SM, et al. Seawater intrusion impacts on groundwater and soil quality in the northern part of the Nile Delta, Egypt. *Environ Earth Sci.* 2020;79(13):313. doi.org/10.1007/s12665-020-09069-1
6. Ding L, Li B, Zhang S. Development in researches on seawater intrusion of coastal areas. *Mar Sci Bull (Haiyang Tongbao).* 2004;23(2):82–87.
7. Brodie LP, Caballero SV, Ojea E, et al. A new framework on climate-induced food-security risk for small-scale fishing communities in Tanzania. *Food Secur.* 2024;16(5):1125–1145. doi.org/10.1007/s12571-024-01472-x
8. Mekanjuola SA, Medupin C. Food and water security in developing economies: impact of pandemic and possible interventions. *N Afr J Food Nutr Res.* 2020;4(10):32–38. doi.org/10.51745/najfnr.4.10.S32-S38
9. Chi W, Yang Y, Zhang K, Wang P, Du Y, Li X, et al. Seawater intrusion induced cadmium activation via altering its distribution and transformation in paddy soil. *Chemosphere.* 2022;307:135805. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135805

10. Osewe M, Aijun L, Jiqin H. Sustainable intensification and food security: a panel data assessment of the smallholder maize farmers in Uganda. *Glob Food Secur.* 2023;39:100724. doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100724
11. Altintzoglou T, Aschemann-Witzel J. Trade-offs in food systems: how does upcycling edible resources fit in the big picture? *Trends Food Sci Technol.* 2024;143:104246. doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104246
12. Demelash SA, Alemu EA. Measuring food system sustainability in Ethiopia: towards a multi-dimensional perspective. *Ecol Indic.* 2024;161:111991. doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111991
13. Melesse MB, van den Berg M, Béné C, de Brauw A, Brouwer ID. Metrics to analyze and improve diets through food systems in low- and middle-income countries. *Food Secur.* 2020;12(5):1085–1105. doi.org/10.1007/s12571-020-01091-2
14. Olufemi-Phillips AQ, Igwe AN, Ofodile OC, Louis N. Analyzing economic inflation's impact on food security and accessibility through econometric modeling. *Int J Green Econ.* 2024;18(3):142–156. doi.org/10.30574/gscarr.2024.21.2.0411
15. Rasheed R, Ishaq MN, Akbar M. A correlation of socio-economic determinants and food security status in Pakistan. *Pak J Humanit Soc Sci.* 2022;10(1):416–425. doi.org/10.52131/pjhss.2022.1001.0206
16. Bununu YA, Bello A, Ahmed A. Land cover, land use, climate change and food security. *Sustain Earth Rev.* 2023;6(1):16. doi.org/10.1186/s42055-023-00065-4
17. Magsi H, Atif S. Water management, impacts and conflicts: case of Indus water distribution in Sindh, Pakistan. *Int J Rural Stud.* 2012;19(2):3–7.
18. Magsi H, Sheikh MJ. Seawater intrusion: land degradation and food insecurity among coastal communities of Sindh, Pakistan. In: *Regional Cooperation in South Asia: Socio-economic, Spatial, Ecological and Institutional Aspects.* Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 209–223. doi.org/10.1007/978-3-319-56747-1_12
19. Ahmed A, Noonari TM, Magsi H, Mahar A. Risk assessment of total and faecal coliform bacteria from drinking water supply of Badin city, Pakistan. *J Environ Prof Sri Lanka.* 2013;2(1):52–64. doi.org/10.4038/jepsl.v2i1.5750
20. Narmcheshm S, Esmailzadeh A, Babashahi M, Sharegh Farid E, Dorosty AR. Socioeconomic determinants of food insecurity in Iran: a systematic review. *J Asian Afr Stud.* 2024;59(6):1908–1960. doi.org/10.1177/00219096231161893
21. Simpson NP, Williams PA, Mach KJ, Berrang-Ford L, Biesbroek R, Haasnoot M, et al. Adaptation to compound climate risks: a systematic global stocktake. *iScience.* 2023;26(2). doi.org/10.1016/j.isci.2023.105926
22. Sindh Coastal Development Program (SCCDP). Baseline survey of coastal areas. Vol. 1. Main Final Report. Karachi: Sindh Coastal Development Authority; 2012.
23. Government of Pakistan (GOP). Pakistan Economic Survey 2013–2014 [Internet]. Islamabad: Economic Advisors Wing, Ministry of Finance; 2014. Available from: https://www.finance.gov.pk/survey/chapters_14/highlights_es_201314.pdf
24. Hashmi MS, Zhang J, Hashmi MS. Land distribution, technological changes and productivity in Pakistan's agriculture: some explanations and policy options. *Management.* 2011;1(1):51–74.
25. Arif M, Khalid N. Agriculture and food security in Pakistan. Lahore: South Asia Partnership–Pakistan; 2007.
26. IUCN. Mangroves of Pakistan: Status and management. Karachi: International Union for Conservation of Nature–Pakistan; 2005.
27. Khan MA, Khan JA, Ali Z, Ahmad I, Ahmad MN. The challenge of climate change and policy response in Pakistan. *Environ Earth Sci.* 2016;75(5):412. doi.org/10.1007/s12665-015-5127-7

Теңіз суының жағалаудағы агроэкожүйелерге енуінің биологиялық және әлеуметтік-экономикалық салдары

И.А. Боздар¹, Р. Ахмед¹, А.Б. Чачар*¹, Р.Н. Малано¹, Х. Магси¹, А.А. Махесар¹

¹Ауыл шаруашылығы экономикасы кафедрасы, ауылшаруашылық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Тандожам, Пәкістан

Аңдатпа. Теңіз суының енуі (ТСЕ) Пәкістанның Бадин ауданының жағалау аймағында маңызды экологиялық және әлеуметтік-экономикалық мәселеге айналды. Бұл зерттеу үй шаруашылығын сауалнамалар мен әлеуметтік-экономикалық профильдеу арқылы ауылдағы өмір сүруге, азық-түлік қауіпсіздігіне және көші-қонға ТСЕ әсерін зерттейді. Нәтижелер ауыл шаруашылығының негізгі күнкөріс көзі болып қала беретінін көрсетті, респонденттердің 55%-ы айналысады. Алайда, тұщы судың азаюы және топырақтың сортаңдануы өңделетін жерлердің 22%-ға жуығын нашарлатып, егістік өнімділігі мен мал басының азаюына әкелді. Үй шаруашылығының орташа айлық табысы (17 042 рупий) шығыстардан (16 072 рупий) әрең асып түседі, бұл отбасыларды азық-түлік қауіпсіздігіне өте осал етеді. Нашар инфрақұрылым, медициналық көмекке және қауіпсіз суға қол жетімділіктің шектелуі және пайдаланатын несие жүйесі кедейлікті одан әрі ушықтырады. Табиғи апаттар, соның ішінде су тасқыны, мезгілсіз жаңбырлар мен дауылдар ТСЕ әсерін күшейтеді, ал ақаулы сол жағалаудағы дренаж жүйесі (СЖДЖ) жердің тозуын және егіннің жоғалуын күшейтті. Нәтижесінде көші-қон жеңу стратегиясына айналды және 100-ден астам үй шаруашылықтары ауылшаруашылық мүмкіндіктерінің төмендеуіне байланысты зардап шеккен кәсіподақ кеңестерінен қоныс аударуға мәжбүр болды. Зерттеу ТСЕ тек экологиялық проблема ғана емес, сонымен қатар әлеуметтік-экономикалық тұрақсыздықтың, кедейліктің және ауылдан қалаға көші-қонның драйвері екенін көрсетеді. ТСЕ әсерін азайту және азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін шұғыл саясат шаралары қажет, мысалы, Котри бөгетінен төмен қарай реттелетін тұщы суды шығару, СЖДЖ қалпына келтіру, бөгетті нығайту және өнеркәсіптік ағынды суларды қатаң басқару. Бұл тұжырымдар климаттың өзгеруіне бейімделуді, су ресурстарын тұрақты басқаруды және қауымдастықтың тұрақтылығын жағалауды дамытудың ұлттық стратегияларына енгізудің шұғыл қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: теңіз суының енуі, азық-түлік қауіпсіздігі, жағалаудағы өмір сүру құралдары, жердің деградациясы, Бадин ауданы, Синд

Биологические и социально-экономические последствия интрузий морской воды в прибрежные агроэкосистемы

И.А. Боздар¹, Р. Ахмед¹, А.Б. Чачар*¹, Р.Н. Малано¹, Х. Магси¹, А.А. Махесар¹

¹Кафедра аграрной экономики, Факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Тандоджам, Пакистан

Аннотация. Интрузия морской воды (ИМВ) стало критической экологической и социально-экономической проблемой в прибрежной зоне округа Бадин, Пакистан. В данном исследовании изучается влияние ИМВ на жизнеобеспечение сельского населения, продовольственную

безопасность и миграцию посредством опросов домохозяйств и социально-экономического профилирования. Результаты показывают, что сельское хозяйство остается основным источником существования, занимаясь 55% респондентов, однако сокращение доступности пресной воды и засоление почв привели к деградации почти 22% обрабатываемых земель, что привело к снижению урожайности сельскохозяйственных культур и сокращению поголовья скота. Среднемесячный доход домохозяйства (17 042 рупии) едва превышает расходы (16 072 рупии), что делает семьи крайне уязвимыми к отсутствию продовольственной безопасности. Неразвитая инфраструктура, ограниченный доступ к здравоохранению и безопасной воде, а также эксплуататорская кредитная система еще больше усугубляют бедность. Стихийные бедствия, включая наводнения, несезонные дожди и штормы, усугубляют последствия ИМВ, в то время как неисправная система левобережного стока (СЛС) усилила деградацию земель и потери урожая. В результате миграция стала адаптивной стратегией, и более 100 домохозяйств были вынуждены переселиться из пострадавших союзных советов из-за сокращения возможностей для ведения сельского хозяйства. В исследовании подчеркивается, что ИМВ является не только экологической проблемой, но и фактором социально-экономической нестабильности, бедности и миграции из сельской местности в города. Для смягчения последствий ИМВ и обеспечения продовольственной безопасности необходимы срочные меры политики, такие как регулируемый сброс пресной воды ниже по течению от плотины Котри, восстановление СЛС, укрепление дамбы и более строгое управление промышленными стоками. Эти результаты подчеркивают насущную необходимость интеграции мер по адаптации к изменению климата, устойчивого управления водными ресурсами и устойчивости сообществ в национальные стратегии развития прибрежных районов.

Ключевые слова: интрузия морской воды, продовольственная безопасность, прибрежные источники существования, деградация земель, округ Бадин, Синд

Сведения об авторах:

Ихсан Али Боздар – кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Риаз Ахмед – кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Абдул Басит Чачар – кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Раб Наваз Малано – кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Хабибулла Магси – профессор, кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Ахсан Али Махесар – кафедра аграрной экономики, факультет аграрных социальных наук, Сельскохозяйственный университет Синда, Дорога Мирпур-Хас, Тандо-Джем, 70050, Тандоджам, Пакистан

Авторлар туралы мәліметтер:

Ихсан Али Боздар – аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Риаз Ахмед – аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Абдул Басит Чачар – аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Раб Наваз Малано – аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Хабибулла Магси – профессор, аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Ахсан Али Махесар – аграрлық экономика кафедрасы, Аграрлық әлеуметтік ғылымдар факультеті, Синд ауылшаруашылық университеті, Мирпур-Хас жолы, Тандо-Джем, 70050, Тандожем, Пәкістан

Authors' information:

Ihsan Ali Bozdar – department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Riaz Ahmed – department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Abdul Basit Chachar – department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Rab Nawaz Malano – department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Habibullah Magsi – Professor, department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Ahsan Ali Mahesar – department of agricultural economics, faculty of agricultural social sciences, Sindh Agriculture University, Mirpur Khas Road, Tando Jam, 70050, Tandojam, Pakistan

Редакторы: Р.І. Берсімбаі

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: <http://bulbio.enu.kz/>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.

Биологиялық ғылымдар сериясы.

– 3(152)/2025 – Астана: ЕҰҰ. – 166 б.

Шартты б.т. 10,1. Таралымы – сұраныс бойынша

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulbio.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің типографиясында басылды