

ISSN (Print) 2616-6771
ISSN (Online) 2617-9962

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ
BULLETIN **ВЕСТНИК**

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ. ЭКОЛОГИЯ сериясы

CHEMISTRY. GEOGRAPHY. ECOLOGY Series

Серия ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ. ЭКОЛОГИЯ

№ 1(150)/2025

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2025

Astana, 2025

Редакция алқасы: Бас редактор (химия): Копишев Э.Е.

х.ғ.к., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

- Бас редактор (география): Рамазанова Н.Е.**
PhD, қауымдас. проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Бас редактор (экология): Берденов Ж.Г.**
PhD, қауымдас. проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Жауапты хатшы: Уали А.С.**
х.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

**Редакция алқасы:
Химия**

- Адекенов С.М.** х.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі, Фитохимия халықаралық ғылыми-өндірістік холдингі, Қарағанды, Қазақстан
- Айбульдинов Е.К.** PhD, Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Амерханова Ш.К.** х.ғ.д., проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Бакибаев А.А.** х.ғ.д., проф., Томск Политехникалық Университеті, Томск, Ресей
- Байкенов М.** х.ғ.д., проф., Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан
- Джақупова Ж.Е.** х.ғ.к., доцент, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Еркасов Р.Ш.** х.ғ.д., проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Маскевич А.А.** ф.-м.ғ.д., проф., Я.Купала мемлекеттік университеті, Гродно, Беларусь
- Мустафин Р.И.** PhD, доцент., Қазан Мемлекеттік Медициналық Университеті, Қазан, Ресей
- Султанова Н.А.** х.ғ.д., проф., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Филиппов С.К.** PhD, Або Академия университеті, Турку, Финляндия
- Хуторянский В.В.** PhD, проф., Рединг Университеті, Біріккен Корольдік
- Шатрук М.** PhD, проф., Флорида Мемлекеттік Университеті, Талахасси, АҚШ

География

- Атасой Е.** PhD, проф., Бурса-Улудаг Университеті, Бурса, Турция
- Джаналеева К.М.** г.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Сапаров К.Т.** г.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
- Саипов А.А.** п.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық

	университеті, Астана, Қазақстан
Озгелдинова Ж.О.	PhD, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Жангужина А.А.	PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Дунец А.Н.	г.ғ.д., проф., Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Самарханов К.Б.	г.ғ.к., «Астана» халықаралық ғылыми кешені, Астана, Қазақстан
Иржи Хлахула	PhD, проф., А.Мицкевич Университеті, Познань, Польша
Останин О.В.	г.ғ.к., доцент, Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Абдиманапов Б.Ш.	г.ғ.д., проф., Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан
Алагуджаева М.А.	PhD, «Қазақстан Ғарыш Сапары» ҰК АҚ, Астана, Қазақстан

Экология

Сафаров Р.З.	х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Саспугаева Г.Е.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Инкарова Ж.И.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Зандыбай А.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Илеш А.	PhD, проф., Орадя университеті, Орадя, Румыния
Ян А. Вент	Хабилит. докторы, проф., Гданьск университеті, Гданьск, Польша
Мендыбаев Е.Х.	б.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Жамангара А.К.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Ахмеденов К.М.	г.ғ.к., проф., М. Өтемісұлы атындағы Батыс Қазақстан университеті, Орал, Қазақстан

Редакцияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.
Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Техникалық хатшы: Әділбектегі Гүлмира Әділбекқызы

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы

Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 02.02.2021 ж. № KZ81VPY00031939 тіркеу куәлігімен тіркелген

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 33-207). Сайт: <http://bulchmed.enu.kz>

Editorial board: Editor-in-Chief (Chemistry): Kopsishev E.E.
Cand.Chem.Sci., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editor-in-Chief (Geography): **Ramazanova N.E.**
PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editor-in-Chief (Ecology): **Berdenov Zh.G.**
PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive Secretary: **Uali A.S.**
Cand.Chem.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board Chemistry

- Adekenov S.M.** Dr.Chem.Sci., Prof., Academician of NAS RK, International Research & Production Holding Phytochemistry, Karaganda, Kazakhstan
- Aibuldinov E.K.** PhD, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Amerkhanova Sh.K.** Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Bakibayev A.A.** Dr.Chem.Sci., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- Baikenov M.I.** Dr.Chem.Sci., Prof., Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan
- Jakupova Zh.E.** Cand.Chem.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Erkassov R.Sh.** Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Maskevich A.A.** Dr.Phys.-Math.Sci., Prof., Ya. Kupala State University, Grodno, Belarus
- Mustafin R.I.** PhD, Assoc.Prof., Kazan State Medical University, Kazan, Russia
- Sultanova N.A.** Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Filippov S.K.** PhD, Prof., Abo Akademi University, Turku, Finland
- Khutoryanskiy V.V.** PhD, Prof., University of Reading, United Kingdom
- Shatruk M.** PhD, Prof., Florida State University, Tallahassee, USA

Geography

- Atasoy E.** Phd, Prof., Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye
- Dzhanaleyeva K.M.** Dr.Geogr.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Saparov K.T.** Dr.Geogr.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Saipov A.A.** Dr.Ped.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
- Ozgeldinova Zh.** PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Zhanguzhina A.A.	PhD, acting Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Dunetc A.N.	Dr.Geogr.Sci., Prof., Altai State University, Barnaul, Russia
Samarkhanov K.B.	Cand.Geogr.Sci., International Science Complex «Astana», Astana, Kazakhstan
Jiří Hlahula	PhD, Prof., A. Mickiewicz University, Poznan, Poland
Ostanin O.V.	Cand.Geogr.Sci., Assoc.Prof., Altai State University, Barnaul, Russia
Abdimanapov B.Sh.	Dr.Geogr.Sci., Prof., Abay Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
Alagudzhaeva M.A.	PhD, JSC NC "Kazakhstan Garysh Sapary", Astana, Kazakhstan

Ecology

Safarov R.Z.	Cand.Chem.Sci., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Saspugayeva G.E.	PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Inkarova J.I.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zandybai A.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ilesh A.	PhD, Prof., University of Oradea, Oradea, Romania
Jan A. Wendt	Dr.habil., Prof., Gdansk University, Poland
Mendibaev E.Kh.	Cand.Biol.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zhamangara A.K.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Akhmedenov K.M.	Cand.Geogr.Sci., Prof., M. Otemiusly West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 402,
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008
Tel.: +7 (7172) 709-500 (ext. 33-207), **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Technical secretary: Adilbektegi Gulmira Adilbekkizi

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Chemistry. Geography. Ecology 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 Registration certificate № KZ81VPY00031939 from 02.02.2021

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

Tel: +7 (7172) 709-500 (ext. 33-207). Website: <http://bulchmed.enu.kz>

Редакционная коллегия: Главный редактор (химия): Копишев Э.Е.
к.х.н., Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Главный редактор (география):	Рамазанова Н.Е. <i>PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан</i>
Главный редактор (экология):	Берденов Ж.Г. <i>PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан</i>
Ответственный секретарь:	Уали А.С. <i>к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан</i>

Редакционная коллегия:
Химия

Адекенов С.М.	д.х.н., проф., академик НАН РК, Международный научно-производственный холдинг Фитохимия, Караганда, Казахстан
Айбульдинов Е.К.	PhD, НИИ новых химических технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Амерханова Ш.К.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Бакибаев А.А.	д.х.н., проф., Томский политехнический университет, Томск, Россия
Байкенов М.И.	д.х.н., проф., Карагандинский университет им. Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан
Джакупова Ж.Е.	к.х.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Еркасов Р.Ш.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Маскевич А.А.	д.ф.-м.н., профессор, Гродненский государственный университет имени Я. Купалы, Гродна, Беларусь
Мустафин Р.И.	PhD, доцент, Казанский государственный медицинский Университет, Казань, Россия
Султанова Н.А.	к.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Филиппов С.К.	PhD, проф., Университет Академия Або, Турку, Финляндия
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Университет Рединга, Объединенное Королевство
Шатрук М.	PhD, проф., Государственный университет Флориды, Талахасси, США

География

Атасой Е.	PhD, проф., Университет Бурсы-Улудаг, Бурса, Турция
Джаналеева К.М.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Сапаров К.Т.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Саипов А.А.	д.п.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Озгелдинова Ж.О.	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жангужина А.А.	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Дунец А.Н.	д.г.н., проф., Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
Самарханов К.Б.	к.г.н., Международный научный комплекс «Астана», Астана, Казахстан
Иржи Хлахула	PhD, проф., Университет им. А. Мицкевича, Познань, Польша
Останин О.В.	к.г.н., доцент, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
Абдиманатов Б.Ш.	д.г.н., проф., Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан
Алагуджаева М.А.	PhD, АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», Астана, Казахстан

Экология

Сафаров Р.З.	к.х.н., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Саспугаева Г.Е.	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Инкарова Ж.И.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Зандыбай А.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Илеш А.	PhD, проф., Университет Орадя, Орадя, Румыния
Ян А. Вент	д.г.н., проф., Университет Гданьска, Гданьск, Польша
Мендыбаев Е.Х.	к.б.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жамангара А.К.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Ахмеденов К.М.	к.г.н., проф., Западно-Казахстанский университет им. М.Утемисова, Уральск, Казахстан

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402

Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz

Технический секретарь: Адильбектеги Гульмира Адильбеккызы

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.

Серия Химия. География. Экология

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Регистрационное свидетельство № KZ81VPY00031939 от 02.02.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Тел.: +7(7172)709-500 (вн.33-207). Сайт: <http://bulchmed.enu.kz>

Е. Айбульдинов, Н. Нургалиев, Р. Сафаров, Ж. Искакова, А. Колпек, Т. Машан, Л. Кусепова

Тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы

Е. Айбульдинов, Н. Нургалиев, Р. Сафаров, Ж. Искакова, А. Колпек, Т. Машан, Л. Кусепова

Технология быстрого пиролиза с твердым теплоносителем для переработки твердых бытовых отходов

Ye. Aibuldinov, N. Nurgaliev, R. Safarov, Zh. Iskakova, A. Kolpek, T. Mashan, L. Kusepova
Fast pyrolysis technology with solid heat carrier for municipal solid waste processing

11

Р. Дюсова, М. Борашова, Я. Сергеев, И. Куанышев

Өнеркәсіптік деректер негізінде бекітілген қабаттағы каталитикалық риформинг процесін модельдеу

Р. Дюсова, М. Борашова, Я. Сергеев, И. Куанышев

Моделирование процесса каталитического риформинга с неподвижным слоем катализатора на основе промышленных данных

R. Dyusova, M. Borashova, J. Sergeevs, I. Kuanyshev

Modeling of catalytic reforming process with fixed bed catalyst based on industrial data

36

Р. Салихов, М. Петров

Сланецтің төмен температуралық пиролизін зерттеу: физика-химиялық қасиеттері және термиялық ыдырау өнімдері

Р. Салихов, М. Петров

Исследование низкотемпературного пиролиза нефтяного сланца: физико-химические свойства и продукты термического разложения

R. Salikhov, M. Petrov

Study of low-temperature pyrolysis of oil shale: physico-chemical properties and thermal decomposition products

52

А. Сыздық, Г. Сейтенова, Е. Жакманова, Л. Толымбекова

Екіншілік полимерлердің полимер-модификацияланған битум қасиеттеріне әсерін талдау

А. Сыздық, Г. Сейтенова, Е. Жакманова, Л. Толымбекова

Анализ влияния вторичных полимеров на свойства полимер-модифицированного битума

A. Syzdyk, G. Seitenova, E. Zhakmanova, L. Tolymbekova

Analysis of the influence of secondary polymers on the properties of polymer-modified bitumen

66

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОГРАФИЯ/ GEOGRAPHY

И. Айдын, Х. Онал

Біріккен Ұлттар Ұйымының тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізудегі ауылдық туризмнің үлесі

И. Айдын, Х. Онал

Вклад сельского туризма в достижение целей ООН в области устойчивого развития

I. Aydin, H. Onal

Contributions of rural tourism to achieving the United Nations sustainable development goals

82

Г. Ахметбекова, И. Плачинта, Г. Саматова, Г. Байгукин

Рельеф-Щучье-Боровое курорттық аймағының тұрақты дамуындағы туристік тартымдылық артықшылықтарының факторы

Г. Ахметбекова, И. Плачинта, Г. Саматова, Г. Байгукин

Рельеф как фактор преимуществ туристской привлекательности Щучинско-Боровской курортной зоны в целях устойчивого развития

G. Akhmetbekova, I. Plachinta, G. Samatova, G. Baigukin

Relief as a factor of advantages of tourist attractiveness of the Shchuchinsk-Borovskoy resort zone for the purposes of sustainable development

94

А. Валеев, А. Асылбекова, О. Таукебаев, М. Кудайбергенов, Н. Жеңісова, Е. Жанатбеков, Т. Имандосов

Семей ядролық сынақ полигонының қазіргі рельефінің морфометриялық жағдайын бағалау

А. Валеев, А. Асылбекова, О. Таукебаев, М. Кудайбергенов, Н. Жеңісова, Е. Жанатбеков, Т. Имандосов

Оценка морфометрических условий современного рельефа Семипалатинского испытательного ядерного полигона

A. Valeev, A. Assylbekova, O. Taukebayev, M. Kudaibergenov, N. Zhenissova, Ye. Zhanatbekov, T. Imandosov

Assessment of the morphometric conditions of the modern relief of the Semipalatinsk nuclear test site

111

Ж. Мұстафаев, Г. Әділбектегі, Қ. Мұстафаев, Қ. Әбдешев, Г. Саспугаева, Н. Тұрсынбаев

Гидрологиялық және климаттық бақылау деректері негізінде Сарысу өзені бассейнінің су балансының элементтерін модельдеу

Ж. Мустафаев, Г. Адильбектеги, К. Мустафаев, К. Абдешев, Г. Саспугаева, Н. Тұрсынбаев

Моделирование элементов водного баланса бассейна реки Сарысу на основе данных гидрологических и климатических наблюдений

Zh. Mustafayev, G. Adilbektegi, K. Mustafayev, K. Abdeshev, G. Saspugayeva, N. Tursynbayev

Modelling of water balance elements in the Sarysu River basin on hydrological and climatic observation data

129

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ
ЭКОЛОГИЯ/ ECOLOGY

П. Дмитриев, К. Каримова

Экологиялық зейін интерактивті тренажерлердің білім беру әлеуетінің негізгі аспектісі ретінде

П. Дмитриев, К. Каримова

Экологическая осознанность как ключевой аспект образовательного потенциала интерактивных симуляторов

P. Dmitriyev, K. Karimova

Environmental awareness as a key aspect of the educational potential of interactive simulators

152

А. Жаманғара, Ш. Ақмағамбет, С. Нигматова

Күшік мекенінің (Тургай ойпаты) ерте миоцен кезеңіндегі Coexistence Approach әдісі негізінде жүргізілген палеоклиматтық талдау

А. Жаманғара, Ш. Ақмағамбет, С. Нигматова

Палеоклиматический анализ раннего миоцена в местонахождении Кушук (Тургайская впадина) на основе метода совместного существования (Coexistence Approach)

A. Zhamangara, Sh. Akmagambet, S. Nigmatova

Paleoclimate analysis of the early miocene in the Kushuk locality (Turgai depression) based on the Coexistence Approach method

171

А. Пятанов, О. Переточенкова, Е. Переточенков, С. Тесленок

Тұрақты даму жағдайындағы Мордовия Республикасының жылу энергетикалық жүйесінің қазіргі жағдайы

А. Пятанов, О. Переточенкова, Е. Переточенков, С. Тесленок

Современное состояние теплоэнергетической системы Республики Мордовия в условиях устойчивого развития

A. Pyatanov, O. Peretochenkova, E. Peretochenkov, S. Teslenok

The current state of the thermal power system of the Republic of Mordovia in the context of sustainable development

185

Т. Салихов, Ж. Берденов, Қ. Сагинов, Ж. Инкарова, Л. Макеева, А. Салькова, Г. Салхожаева
Астана қаласының урбэкожүйелерінің топырақ жамылғысын ГАЗ-технологияларды қолдану негізінде зерттеу

Т. Салихов, Ж. Берденов, К. Сагинов, Ж. Инкарова, Л. Макеева, А. Салькова, Г. Салхожаева
Исследования почвенного покрова урбэкоэкосистем города Астана на основе применения ГИС-технологий

T. Salikhov, Zh. Berdenov, K. Saginov, Zh. Inkarova, L. Makeyeva, A. Salykova, G. Salkozhayeva
Research of soil cover of urban ecosystems of the city of Astana based on the use of GIS technologies

203

Тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы

Еламан Айбульдинов^{1,2}, Нуркен Нурғалиев^{2*}, Руслан Сафаров^{3*}, Жанар Искакова^{1*}, Айнагүл Колпек^{3*}, Тогжан Машан³, Лязат Кусепова³

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru, iskakova_zhb@enu.kz

²К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, химия, химиялық технология және экология кафедрасы, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru, nurgaliev_nao@mail.ru

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Астана, Қазақстан; safarov_rz@enu.kz, kolpek_a@enu.kz, mshan_tt@enu.kz, kusseпова_la@enu.kz

*Корреспонденция: nurgaliev_nao@mail.ru, safarov_rz@enu.kz, iskakova_zhb@enu.kz, kolpek_a@enu.kz

Дәйексөз: Айбульдинов, А., Нурғалиев, Н., Сафаров, Р., Искакова, Ж., Колпек, А., Машан, Т., Кусепова, Л. (2025). Тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 150(1), 11-35.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-11-35>

Академиялық редактор:
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 24.02.2025
Түзетілді: 26.02.2025
Қабылданды: 10.03.2025
Басылымға шықты: 31.03.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аңдатпа. Тұрмыстық қатты қалдықтарды (ТҚК) қайта өңдеу урбанизация мен қалдықтардың көбеюіне байланысты экологиялық проблемаларды шешу үшін өте маңызды. Бұл мақалада тұрмыстық қатты қалдықтарды тиімді өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушылары бар жылдам пиролиз технологиясын пайдалану қарастырылады. Алғашында жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген технология өзінің күлін пайдалана отырып жылу тасымалдағыш ретінде, оттегісіз ортада қалдықтарды термиялық ыдыратуды қарастырады. Бұл әдіс синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдары мен ферроқорытпаларды т.б. құнды өнімдерді өндіруге мүмкіндік береді. Зерттеу аясында өнімділігі 150 000 тонна/жыл (УТТ-500) және 1 000 000 тонна/жыл (УТТ-3000) болатын жылдам пиролиз қондырғыларына кешенді техника-экономикалық талдау жүргізіледі, олардың техникалық жағдайын, экономикалық тиімділігін және экологиялық көрсеткіштерін бағалайды. Нәтижесінде, бұл технология дәстүрлі өртеумен салыстырғанда зиянды шығарындыларды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді және қалдықтардың әртүрлі түрлерін қайта өңдеуді қамтамасыз етеді. Жабық цикл бойынша алынған нәтижелер экономикалық жағынан тиімді және қалдықтарды тұрақты өңдеу тәжірибесін енгізуге ықпал ете отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуді жақсарту үшін жылдам пиролиз әдісінің артықшылығын дәлелдейді. Бұл зерттеу, қалдықтарды кәдеге жарату тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға тигізетін зиянды әсерді азайту, қалалық жерлерде қалдықтарды өңдеу мәселелерін шешу үшін инновациялық шешімдердің қажеттілігін көрсетеді.

Түйінді сөздер: тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚК); жылдам пиролиз; қатты жылу тасымалдағыш; қалдықтарды энергияға айналдыру; техникалық-экономикалық талдау.

1. Кіріспе

Қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеу тарихы қалалар мен жаңа технологиялардың дамуының көрінісі болып табылады. Ежелгі уақытта қалдықтарды көбінесе өртеген немесе қала сыртына тастаған. Ортағасырлық Еуропада тұрмыстық қоқыстар санитарлық тазалық өмірдің маңызды аспектісіне айналғанға дейін көшеде жай жиналатын. XIX ғасырдың аяғында халық санының өсуімен және урбанизациямен байланысты, алғаш рет өртеу қондырғылары мен қалдықтарды кәдеге жарату жүйелері салына бастады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды (ТҚК) қайта өңдеу урбанизацияның, халық санының өсуінің және экологиялық мәселелердің артуына байланысты дүние жүзінде қалдықтарды басқару стратегияларының маңызды құрамдас бөлігіне айналды (Ma, J. және т.б., 2016; Guan, D. және т.б. 2024; Vanchurin, V. және т.б., 2022). Бұл процесс тұрмыстық және коммерциялық қалдықтар арасынан қайта өңдеуге жарамды материалдарды жинауды, сұрыптауды және жаңа өнімдерге түрлендіруді қамтиды. Осылайша полигондарға немесе өртеу қондырғыларына жіберілетін қалдықтардың көлемін азайтады. Қайта өңдеу технологияларындағы елеулі жетістіктерді арттыруға қарамастан, жаһандық қайта өңдеу салыстырмалы түрде төмен деңгейде қалып отыр, 2020 жылғы жағдай бойынша дүние жүзінде ТҚК-дың шамамен 13,5 % ғана қайта өңделеді (Kaza, S. және т.б., 2018). Бұл муниципалитеттердің де, жалпы елдердің де қалдықтарды басқару мәселелері бойынша, оларды шешу үшін қалдықтарды кәдеге жарату жүйелері мен саясатын жетілдірудің шұғыл қажеттілігін көрсетеді.

Қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жарату бағдарламаларының тиімділігіне әртүрлі факторлар әсер етеді, соның ішінде жұртшылықтың қатысуы, технологиялық мүмкіндіктер, экономикалық тиімділік және нормативтік-құқықтық база (Vukovic, N. және т.б., 2022; Ren, Z. және т.б., 2024; Kumar, R. және т.б., 2024; Louzizi, T. және т.б., 2024). Кейбір елдер қайта өңдеу бойынша кешенді бастамаларды жүзеге асыруда айтарлықтай жетістіктерге қол жеткізгенімен, инфрақұрылымның жеткіліксіздігімен, ресурстардың шектеулілігімен және адамдардың қатысуының болмауымен бетпе-бет келеді. Сонымен қатар, қазіргі заманғы тұтыну тауарларының, әсіресе электроника мен қаптаманың жасалған материалдарының күрделілігі қайта өңдеу процесіне қосымша қиындықтар туғызады (Farzadkia, M. және т.б., 2021; Nassajfar, M.N. және т.б., 2024).

Зерттеушілер мен саясаткерлер қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жарату тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға әсерді азайту үшін инновациялық шешімдерді зерттеуді жалғастыра отырып, циклді экономика қағидаттарын қабылдауға және қалдықтардың пайда болуының түпкі себептерін жою үшін тұтынудың неғұрлым тұрақты үлгілерін әзірлеуге көбірек көңіл бөлуде (Asif, M. және т.б., 2025; Kowalski, Z. және т.б., 2024).

Қатты тұрмыстық қалдықтармен жұмыс істеу саласында қалдықтарды энергияға айналдыру тұжырымдамасы, қалдықтарды кәдеге жаратудың тиімді тәсіліне айналды. Бұл әдіс қалдықтарды түрлендіріп, олардың мөлшерін азайту және энергия өндіру мәселелерін шеше отырып, осы процестің құнды баламалы энергия көзі бола алатынын дәлелдейді (Liu, J. және т.б., 2023; Kasiński, S. және т.б., 2024).

Осындай перспективалы тәсілдердің бірі қатты жылу тасымалдаушыны пайдаланатын жылдам пиролиз болып табылады. Ол қалдықтардың әртүрлі түрлерін, соның ішінде қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеудің әлеуетті шешімін ұсынады. Дәстүрлі пиролиз әдістерінен айырмашылығы, жылдам пиролиз арнайы араластырғышта миллисекунд ішінде жүреді. Мұнда шикізат 800°C дейін қыздырылған күлмен жанасады және қатты қалдықтың температурасын тез арада 500-520°C дейін көтеріледі. Бұл әдіс жылдам термиялық ыдырау процесін пиролиз процесінен ерекшелендіреді. Ол әдетте төмен температурада (300-400°C)

бірнеше сағатты алады және қалыпты қыздыру жылдамдығымен бірнеше минуттан бірнеше сағатқа дейін жүретін стандартты пиролизден әлдеқайда жылдам жүріледі. Араластырғыштағы бастапқы қадамнан кейін материал айналмалы барабан реакторына түседі, онда ол 15-20 минут ішінде одан әрі пиролизденеді, бұл қалдықтардың пайдалы өнімдерге айналуын қамтамасыз етеді.

Жылдам пиролиз әртүрлі өнеркәсіптік процестерде, атап айтқанда жанғыш тақтатастар мен қоңыр көмірді өңдеуде сәтті жүзеге асырылды (Asadullah, M. және т.б., 2013). Бірнеше зерттеулер бұл әдіс дәстүрлі баяу пиролизбен салыстырғанда өнімнің жылу шығару тиімділігі мен өнімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті (Yorgun, S. және т.б., 2015). Дегенмен, бұл әдістің қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуде қолданылуы бойынша зерттеулер өте аз.

Зерттеу жұмысы қаладан шығарылған қалдықтарды тұрақты өңдеу үшін жылдам пиролизге бейімдеу және оңтайландыру жолындағы маңызды қадам болып табылады.

Дүние жүзінде қалдықтарды энергияға айналдырудың кең таралған әдісі қалдықтарды жағу. Ол сұрыпталмаған немесе өңделмеген қалдықтарды қайта өңдей алады, сонымен бірге қалдықтардың көлемін 90%-ға дейін азайта отырып, энергия өндіреді, осылайша полигондарға қажеттілікті азайтады (Assi, A. және т.б., 2020; Zhou, W. және т.б., 2024). Дегенмен, бұл процестің кемшіліктері де жоқ емес. Жанудың жанама өнімдері, соның ішінде күл қалдықтары және газ тәрізді шығарындылар көбінесе қоршаған ортаға айтарлықтай қауіп төндіреді. Осы қауіптерді азайту үшін қазіргі заманғы өртеу қондырғыларында газды тазартудың көп сатылы күрделі жүйелері қолданылады. Бір қызығы, бұл тазарту жүйелерінің құны көбінесе бастапқы жағуға арналған жабдықтың құнынан асып кетеді, бұл осы тәсілдің экономикалық тиімсіздігін көрсетеді (Zhang, Y. және т.б., 2021; Sharma, P. және т.б., 2024).

Керісінше, термиялық ыдырау технологиялары, атап айтқанда пиролиз, қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеу үшін тікелей жағуға перспективалы балама ұсынады (Kasiński, S. және т.б., 2024; Vinnichenko, V. және т.б., 2023; Sarker, T.R. және т.б., 2024; Razzak, S.A., 2024; Rauch, R. және т.б., 2024; Cui, W. және т.б., 2024). Пиролитикалық әдістердің қатты тұрмыстық қалдықтарды термиялық өңдеуде бір қатар артықшылықтары бар. Олар зиянды шығарындыларды, әсіресе улылығы жоғары полихлорланған дибензопарадиоксиндер мен дибензофурандарды айтарлықтай азайтады (Cui, W. және т.б., 2024; Traven, L., 2023; Liang, Y. және т.б., 2021). Сонымен қатар, пиролиз әдістері жан-жақты, ол отынды дайындауды қажет етпейді және әртүрлі құрамдағы қалдықтарды қайта өңдеуге мүмкіндік береді (Narayani Sarma, R. және т.б., 2023; Wang, J. және т.б., 2019; Li, N. және т.б., 2022). Бұл қоршаған ортаға түсетін зиянды қалдықтарды азайту, пиролизден кейінгі қалдықтарды энергияға айналдыру технологияларының дамып келе жатқан нұсқасы.

Инновациялық технологиялар ТҚК кәдеге жаратудың жаһандық мәселелерін ескере отырып, өңдеудің тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға зиянды әсерді азайту үшін маңызды шешімдер қабылдауы тиіс. Осындай перспективалы тәсілдердің бірі қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз әдісі болып табылады. Ол қалдықтардың әртүрлі түрлерін, соның ішінде қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеудің әлеуетті шешімін ұсынады. Бұл зерттеуде жылына 150 000 тонна қалдықты өңдеуге қабілетті қатты жылу тасымалдаушысы бар қондырғыларда жылдам пиролиз технологиясын қолдана отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеудің техника-экономикалық талдауы ұсынылған ((UTT-500) және 1 000 000 тонна/жыл (UTT-3000) құрғақ масса). Бастапқыда жанғыш тақтатастарды қайта өңдеу үшін әзірленген әдіс қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеуге бейімделген. Бұл әдіс қалдықтарды қайта өңдеу мен кәдеге жаратудың дәстүрлі әдістерінен қарағанда тиімдірек және экологиялық таза балама ұсына алады.

Ұсынылып отырған технология 1940 жылдары Кржижановский, Г.М. (Мәскеу, Ресей) Энергетика институтының мамандары әзірлеген жылдам пиролиз әдісіне негізделген (Potarov, O.P. және т.б., 2017). Әдіс жылу тасымалдағыш ретінде өз күлін пайдалана отырып, оттегісіз ортада ұсақ ұнтақталған шикізаттың үздіксіз термиялық ыдырауын қамтамасыз етеді. Процесс барысында бу-газ қоспасымен көміртегі қалдығы (жартылай кокс) алынады (Volkov,

Е.Р. және т.б., 1999). Бұл әмбебап әдіс тақтатаc, қоңыр көмір, қатты тұрмыстық қалдықтарды қоса алғанда, әртүрлі төмен әлеуетті шикізатты өңдеуге жарамды (Gerasimov, G. және т.б., 2019).

Осы технология Балтық аймағындағы жанғыш тақтатастарын өңдейтін бірнеше зауыттарда сәтті қолданылып келеді. Нақты мысалдарға мыналар жатады: Кивыли химиялық зауытында (Эстония) екі УТТ-500 бірлік қондырғысы, Эстония электрстанциясындағы «Майзауытында» екі УТТ-3000 бірлік қондырғысы және Кохтла-Ярвадағы (Эстония) үш УТТ-3000 бірлік қондырғысы (Tugov, A.N. және т.б., 2016). Осы УТТ типтегі қондырғылардың жалпы өңдеу қуаты жылына 5,3 миллион тоннадан асады және пайдалану мерзімі 6-12 жылдан (Кохтла-Ярве) 40 жылға дейін созылады («Майзауыты») (Potarov, O.P., 2016).

Технологияны жанғыш тақтатастарын өңдеуде ұзақ уақыт қолдану, оның сенімділігі мен тиімділігін көрсетеді. Бұл қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуге осы қондырғыларды қолданудың тиімділігін білдіреді. Біздің зерттеулеріміз қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеуге қатысты мәселелерді шешу үшін осы технологияны бейімдеуге және оңтайландыруға бағытталған. Қалдықтарды өңдеудің дәстүрлі әдістерімен ұсынылып отырған әдісті салыстырғанда энергияны қалпына келтіру және қоршаған ортаға әсер ету тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтары бар.

Қайта өңдеуге арналған мұндай кешенді тәсіл қатты тұрмыстық қалдықтарды басқарудың өзекті мәселесін шешіп қана қоймайды, сонымен қатар әртүрлі өнеркәсіптік қалдықтардың жиналуын жою жолдарының шешімін ұсынады. Жылдам пиролиз әдісі қалдықтарды құнды ресурстарға айналдыру арқылы технологияны экономикалық тиімді етеді және қалдықтарды өңдеудің тұрақты тәжірибесіне айналуына ықпал етеді (Moradi, R. және т.б., 2024). Қалдықтардың алуан түрін қайта өңдеу әдісі бір мезгілде көптеген құнды өнімдерді алу мүмкіндігі бар жылдам пиролиз технологиясының жан-жақтылығы мен экономикалық тиімділігін көрсетеді.

Бұл зерттеудің мақсаты қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясын пайдалана отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуге кешенді техника-экономикалық талдау жүргізу болып табылады. Атап айтқанда, біз ұмтыламыз:

1. Қуаттылығы жылына 150 мың тонна (УТТ-500) және 1 000 000 тонна (УТТ-3000) болатын ТҚҚ өңдеуге арналған жылдам пиролиз қондырғыларының техника-экономикалық тиімділігіне баға беру.

1. Пиролиз процесі арқылы синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдарын, ферроқорытпаларды және басқадай бағалы өнімдерді өндіру әлеуетін бағалау.

2. Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технологияны қатты тұрмыстық қалдықтарды, қоңыр көмірді және өнеркәсіптік қалдықтарды, бұдан басқа жеңіл өнеркәсіп өндірісіне қажетті шикізаттың әртүрлі түрлерін өндіруге бейімдеуді зерттеу.

Осы талдау арқылы біз қалаларда қалдықтарды кәдеге жарату және ресурстарды қалпына келтірудің негізгі мәселелерін шеше отырып, тұрмыстық қатты қалдықтарды өңдеудің экономикалық тұрғыдан тиімді және экологиялық жағынан таза болатыны туралы шешімдерді әзірлеуге үлес қосуға тырысамыз.

2. Материалдар мен әдістер

2.1 Сынамаларды дайындау

Тұрмыстық қатты қалдықтардың (ТҚҚ) сынамаларын дайындау әдістемесі сынамаларды іріктеу, өңдеу және сақтаудың стандарттарына, талдауды және сапаны бағалауды қамтамасыз ететін нақты ережеге сүйене отырып жасалған. Сақтау жағдайларына және қалдықтардың күйіне байланысты сынамаларды алудың әртүрлі әдістері қолданылды. Сынаманы конвейр арқылы жүргізілген материал ағынынан алу қолайлы әдіс болып табылады. Себебі ол материалдың біртектілігіне байланысты болатын қателерді барынша азайтты. Сынамалар

барлық партия бойынша біркелкі таралуын қамтамасыз ететін жылжымалы конвейер таспасынан алынды. Көліктің жәшігінен сынама алу, қалдықтар тізбек арқылы партиялармен жөнелтілген кезде жүргізілді. Әрбір партия үшін көлік жәшігінің әртүрлі деңгейлерінен (бетінен, ортасынан және түбінен) алынған нүктелік сынамалардың белгілі бір мөлшері қажет болды. Егер қалдықтар үйінділерде немесе контейнерлерде жиналса стационарлық материалдардан (жинақталған қалдықтардан) сынама алу жүргізілді. Бұл жағдайда біркелкі композицияны қамтамасыз ету үшін үлгілер бірнеше рет іріктелді.

Материалдың біркелкілігін және репрезентативтілігін қамтамасыз ету үшін әрбір топтамада іріктелген үлгілер саны кем дегенде 24 болуы қажет. Жиналған үлгілерді бөлшектерінің өлшемін <100 мкм болатындай етіп ұсақтайды. Сынамада фракциялық бөліну болдырмау және сынаманың құрамы біркелкі болуын қамтамасыз ету үшін ұнтақтау мен гомогенизация процесінің алдында сынаманы алдын ала өңдеуден өткізді.

Зерттелетін үлгінің ылғалдылығы 15%-дан жоғары болған жағдайда кептіру жүргізілді. Мұндай жағдайларда материал +5°C аспайтын температурада бір аптадан аспайтын мерзімге сақталды. Егер ұзақ мерзімге сақтау қажет болса, зерттеу алдында сынаманы кептіру қажет. Дайындалған үлгілер ылғалдың сіңуіне және олардың химиялық қасиеттерінің өзгеруіне жол бермеу үшін құрғақ бөлмеде ауа өткізбейтін контейнерлерде сақталды. Үлгінің шығу тегі, сынамаларды алу әдісі және сақтау шарттары туралы барлық мәліметтер зертханалық журналда жазылды. Сынамаларды дайындаудың бұл әдістемесі қатты тұрмыстық қалдықтардың құрамын зерттеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз етіп, олардың жылдам пиролиз арқылы өңдеуге жарамдылығын объективті бағалауға мүмкіндік берді.

2.2. ТҚҚ-ды пиролиздеу процесі

ТҚҚ термиялық ыдырауының, қатты, сұйық және газ тәріздес өнімдерінің шығымдылығын талдау 470-520°C температура диапазонында жүргізілді. Процесс алюминийлі ретортында жүргізіледі. Онда үлгі оттегісіз атмосферада 80 минут бойы қыздырылды. Бұл қондырғы конденсацияға ұшырайтын органикалық компоненттердің ыдырауын бақылауға және ұшқыш өнімдерді жинауға мүмкіндік береді. Нақты сандық анықтауды қамтамасыз ету үшін экспериментке алынған фракцияларды жүйелі түрде бөлу және өлшеу қажет.

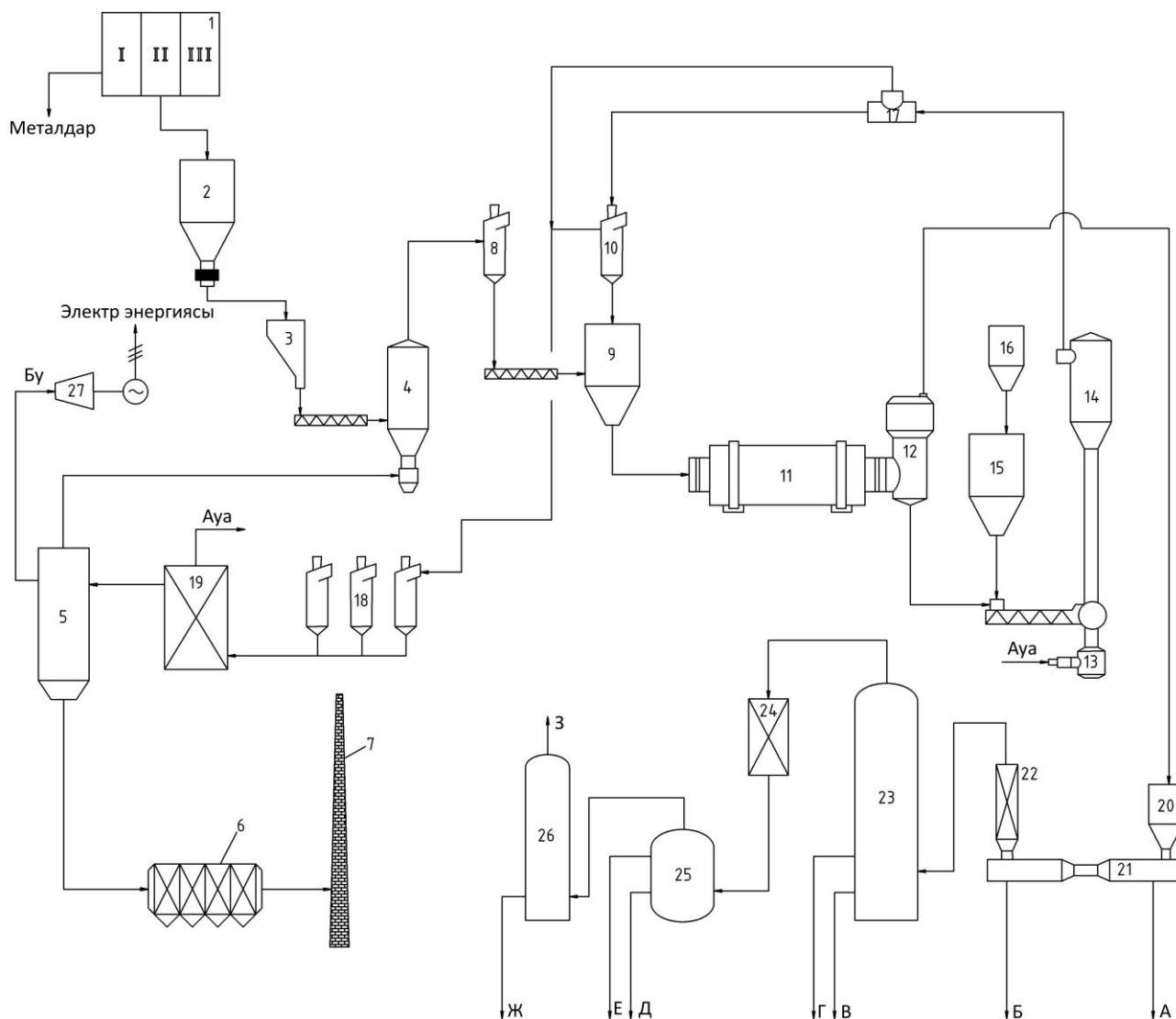
Пиролизден кейін ретортта қалған қатты қалдық (көмірқышқылдандырғыш) карбонизацияланған фракцияның шығымдылығын анықтау үшін өлшенді. Шайыр мен пиролизикалық судан тұратын конденсацияланған фаза су моншасында салқындалатын қабылдағышқа жиналады. Пиролит суының массасы толуол негізіндегі дистилляция әдісі арқылы анықталды. Ал шайырдың шығымы конденсацияланған өнімдердің жалпы массасынан пиролит суының массасын алу арқылы есептеледі. Газ фракциясы үлгінің бастапқы массасы мен көмір, шайыр және пиролизикалық су массаларының қосындысы арасындағы айырма ретінде есептеледі. Нәтижелердің дәлдігін қамтамасыз ету үшін барлық өлшеулер жоғары дәлдіктегі аналитикалық таразылардың көмегімен жүргізілді.

Соңғы кездегі жиналған деректер салыстырмалы талдауды жеңілдету үшін бастапқы күйлері әртүрлі құрғақ қосылыстар аналитикалық жағдайларға келтірілді. Әдістеме пиролиз өнімдерінің жаппай таралуын егжей-тегжейлі бағалауға мүмкіндік тудырады. Бұл қатты тұрмыстық қалдықтарды бағалы энергия тасымалдаушыларына айналдырудың тиімділігі туралы түсінік берді. Экспериментті бірнеше рет қайталап жасау нәтижелердің дұрыстығын қамтамасыз ете отырып, ықтимал қате көздерін азайту үшін жүргізіледі.

Технологияның басты ерекшелігі – ұсақталған қалдықтар бөлініп сұрыпталғаннан кейін сұйық күйге ауыстырылады, ал қатты салқындатқыш (ҚС) ретінде ауа бұрқақты жылытқышта қыздырылған 0-2 мм өлшемді құм қолданылады. Содан кейін ТҚҚ қоспасы әкпен бірге айналмалы барабанды пиролиз реакторына беріледі.

1-суретте тұрмыстық қатты қалдықтарды өңдеуге арналған қондырғының сұлбасы көрсетілген. ТҚҚ өңдеу әдісі қатты қалдықтарды сұрыптау және жіктеу, қатты жылу

тасымалдауышпен араластыру, конденсацияға жіберілетін өнімдерден бу-газ қоспасын алуға арналған барабан типті реакторда пиролиздеу және қатты көміртекті қолдана отырып бу алу үшін жылуды қалпына келтіру кезеңдерін қамтиды.



Сурет 1. Қатты салқындатқышы бар жоғары температуралы пиролиздің сұлбасы
 1 – дайындық блогы, 2 – фидер, 3 – қабылдау бункері, 4 – ауа арқылы кептіргіш, 5 – жылу қазандығы, 6 – электростатикалық шөгінділер, 7 – түтін мұржасы, 8 – қатты тұрмыстық қалдықтар циклоны, 9 – араластырғыш, 10 – салқындатқыш циклон, 11 – айналмалы пеш реакторы, 12 – шаң ұстағыш, 13 – ауа жібергіш пеші, 14 – ауа арқылы жылытқыш, 15 – құм бункері, 16 – ауа толтырылған бункері, 17 – салқындатқышты айналып өту, 18 – күл циклондары, 19 – күл жылуалмастырғыш, 20 – дымқыл скруббер, 21 – газ жинау құбыры, 22, 24 – салқындатқыштар, 23 – дистилляциялық колонна, 25 – сепаратор, 26 – мұнара раковинасы, 27 – бутурбинасы. Өнімдер: А – пиролизге арналған ластанған май, В – ауыр-орташа фракция, С – орташа май, D – дизельдік фракция, E – фенолды су, F – бензиндік фракция, G – су және газ конденсаты, H – тұтынушыларға арналған жартылай коксты газ.

Тұрмыстық қатты қалдықтар мен өндірістік қалдықтар кәсіпорынның өндірістік алаңына автомобиль немесе конвейер арқылы тасымалданады. Дайындық бөлімінде (1) қалдықтар ішінара (партиялармен) алдын ала дозиметриялық бақылаудан өтеді, топтарға бөлінеді және сұрыпталады. Мысалы, металл бөлшектерін немесе металл тәріздес заттарды

электромагниттік сепараторлармен ұстау, содан кейін қара металды престоу (түсті металды қолмен алып тастау мүмкіндігі бар) және 0-25 мм фракцияларға ұсақтау, бөгде заттарды кетіру арқылы бейорганикалық бөлікті жіктеу.

Өңдеуге дайындалған шикізат таспалы конвейер арқылы фидерге беріледі (2). Содан кейін қатты қалдықтар конвейер таразы арқылы өтіп, шикізатқа арналған шнектің (шнекті конвейердің) қабылдау бункеріне (3), содан кейін шнекпен ауа арқылы кептіргішке (4) беріледі. Шнек араластырғыштан атмосфераға газдың түсуіне жол бермеу үшін шнек араластырғыш тығыздағыш камерамен жабдықталады.

Кептіруге арналған бу температурасы 150-350°C болатын өңдеу қазандығынан (5) шығатын түтін газы болып табылады. Қалдықты кептіру құбыры абсорберлердегі ұшпа оксидтерден және электростатикалық шөгіндідегі шаңнан тазартылады (6), содан кейін түтін құбыры арқылы атмосфераға шығарылады (7). Қара және түсті металдар құрғақ, ұсақталған қалдықтардан алынып тасталады.

Кептіру сатысынан кейін қатты тұрмыстық қалдықтар циклонға (8) түседі және тығыздағыш бұранда мен сөре түріндегі араластырғышта (9) араластыру сатысына беріледі, содан кейін шикізат өңдеуден алынған күлмен бірге салқындатқыш циклонға (10) жеткізіледі, онда 800-1000°C температурада шикізат құммен және әкпен өңделеді. Шикізат пен салқындатқышты араластырған кезде қоспаның температурасы 470-520°C аралығында болады және пиролиз процесі айналмалы барабан реакторында басталады (11). Қатты салқындатқыштың қатты тұрмыстық қалдықтарға қатынасы 2-3 аралығында болғанда пиролиз процесі жүзеге асырылады.

Реактордан бу-газ қоспасы түріндегі пиролиз өнімдері (сұйық фракциялар буларының және пиролиз ылғалдылығының қоспасы), күл және жартылай кокс кіріктірілген циклондары бар шаң тұндыру камерасына (12) түседі, онда ағындар бөлінеді: қатты фаза жартылай кокс үшін шнекке жіберіледі, ал бу-газ қоспасы механикалық қоспалардан циклондық тазартудан өтеді және конденсациялық жабдыққа түседі, онда ол сұйық синтетикалық отын (ауыр, орташа және жеңіл), газбензин, пирогендік отын фракцияларына бөлінеді. Жартылай кокс газы салқындаған кезде оның ылғалдылығы артады.

Бұрандалы тығыздау камерасындағы жартылай кокс құрамындағы қатты фазаны ауа фонтанды пешіне (13) береді, онда көміртек қалдығы 780-800°C температурада жанып кетеді. Көміртекті жағу үшін үрлеу арқылы температурасы 300-400°C болатын ауа беріледі. Жану температурасы ауа ағынымен реттеледі ($\alpha < 1$).

Ауа фонтанының қыздырғышы (14) құм бункеріне (15) және әк бункеріне (16) тығыздағыш бұранда арқылы қосылады және төменгі жағындағы ауа фонтанды пешіне қосылады.

Ауа фонтанды пештен күл-газ ағыны жылу тасымалдағыштың айналма жолы (17) арқылы өтеді, онда ол екі ағынға бөлінеді, олардың бірі жылу тасымалдағыш циклондарына бағытталған, ал екіншісі циклондарды айналып өтеді. Циклондар пиролиз процесіне қажетті жылу тасымалдағыштың мөлшерін бөледі. Оның шығыны реактордағы температура сенсорының импульсі бойынша жылжымалы демпфермен (қақпамен) циклонға баратын күл-газ қоспасының ағынын өзгерту автоматты түрде реттеледі.

Жылу тасығыш циклондарынан кейін күл-газ ағындары біріктіріліп, үш сатыда орнатылған күл циклондарына (18) бағытталады. Циклондарда ұсталған күл ауырлық күшімен күлді жылу алмастырғышқа (19) түседі, онда ол өзінің жылуын ауа фонтаны пеші мен жылуды қалпына келтіру қазандығы үшін жарылыс ауасына береді. Қыздырылған ауаның температурасы 300-400°C, ал салқындатылған күлдің температурасы 90°C.

Күлден тазартылған және 780°C температурадағы түтін газы жылуды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі, оның потенциалдық және физикалық жылуы энергетикалық параметрлері (3,9 МПа, 440°C) бу алу үшін пайдаланылады. Қазандықтан барлық сұйық фракциялар алынғаннан кейін жартылай кокс газымен, балқыту пештерінде газ бар болса, онда ол қажет болған жағдайда сұйық отынмен өңделеді. Қазандықтың түбіндегі

пайдаланылған газдардың температурасы 150°C . Газдар электростатикалық сүзгіде соңғы тазалауға ұшырайды және бу жолы арқылы атмосфераға шығарылады, немесе шикізатты кептіру үшін пайдаланылады.

УТТ қондырғыларында электр энергиясын өндіру пиролиз процесіндегі химиялық және физикалық жылууды кәдеге жаратуға негізделген. Ауа-фонтанды пеште температура ауа беруді реттеу арқылы дұрысталады. 800°C температураны ұстап тұру үшін берілетін ауа мөлшері жартылай кокстағы көміртектің толық жануы үшін қажетті деңгейден төмен болуы керек. Нәтижесінде түтін газының құрамындағы СО-нің концентрациясы жоғары (өнімдер толық жанбайды) болады. СО-не бай бұл газ кейіннен циклондарда күл жойылғаннан кейін қалдық жылу қазандығында жағылады. Сонымен қатар, қалдық жылу қазандығы конденсация қондырғысынан жартылай коксты газды және балқыту цехынан СО газын алады. Бұл газдардың химиялық энергиясы түтін газының физикалық жылуымен және алдын ала қыздырылған жарылыс ауасымен (күлді салқындату кезінде күл жылу алмастырғышта қызады) жоғары энергиялы бу өндіру үшін қолданылады. Содан кейін бұл бу электр энергиясын өндіруге арналған турбинаға (27) жіберіледі.

Шаң камерасынан бу-газ қоспасы соңғы тазалауға «дымқыл» скрубберге (20) жіберіледі, содан кейін ауыр фракцияны, орташа фракцияны (дизельдік фракцияны алу мүмкін), бензин фракцияларын және пиролиз ылғалдылығын жою үшін сатылы конденсациядан өтеді. Сұйық фракциялар сұйық өнімдердің аралық қоймасына жіберіледі, одан тауарлық паркке айдалады, онда әртүрлі пропорцияларда араластыру арқылы әртүрлі тауарлық өнімдер алуға болады (қазандық және пеш отыны, турбиналық отын, дизельдік отын, бункерлеуге арналған құрамдас бөліктер, теңіз отыны, мазут аналогтары). Пиролиз ылғалдылығы ауа фонтанды пеште отты бейтараптандыруға ұшырайды. Жоғары калориялы жартылай кокс газы жылууды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі.

Технологиялық күл шайырдың ауыр фракциясының тотығуы нәтижесінде алынған битум негізіндегі асфальтбетонды өндіру үшін қолданылады. Күлдің бір бөлігін шихтаға қажетті қоспалармен (көмір, кварцит, темір, манга-нез, әктас) ферроқорытпалар алынатын балқыту пештеріне жіберуге болады.

2.3. УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының техникалық сипаттамалары

УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғылары қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз әдісімен ТҚҚ өңдеуге арналған инновациялық кешендер болып табылады. Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технология қалдықтарды өңдеудің дәстүрлі әдістеріне экологиялық таза балама ұсына отырып, ТҚҚ тиімді түрде кәдеге жаратуға бейімделген.

Өндірістік объектілерді жылытуға және ыстық сумен жабдықтауға арналған жылу энергиясы күлді салқындату кезінде түтікшелі күл жылу алмастырғышта пайда болады. Жылуалмастырғыштың жоғарғы бөлімдерінде күлді ауамен 800°C -тан 400°C -қа дейін салқындатады, ал төменгі бөліктерде одан әрі сумен 400°C -тан $50-90^{\circ}\text{C}$ -қа дейін салқындатады. Температурасы $90-110^{\circ}\text{C}$ жылытылған су тұтынушыларға орталықтандырылған жылу желісі арқылы беріледі. Бұл ретте 400°C дейін қыздырылған ауа ауа-фонтанды пешке және қалдық жылууды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі.

УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының айрықша белгілеріне мыналар жатады:

1. Өңдеу қуаттылығы: УТТ-500 жылына 150 000 тоннаға дейін (тәулігіне 500 т) қалдықты өңдей алады, ал УТТ-3000 жылына 1 миллион тоннаға дейін (3330 т/тәу) қалдықты өңдеуге қабілетті.

2. Өнімнің шығарылымы: Өңдеу кезінде қондырғылар синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдарының компоненттерін, ферроқорытпаларды шығарады.

3. Өзін-өзі энергиямен қамтамасыз ету: Кешендер электр және жылу энергиясына өздерінің қажеттіліктерін қанағаттандыруға қабілетті.

4. Қоршаған ортаны қорғау өнімділігі: Технология зиянды шығарындыларды азайтуға және ресурстарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етуге арналған.

5. Икемді орналасу: нысандар әртүрлі учаскелерде, соның ішінде жұмыс істейтін немесе жоспарланған полигондарда, қалдықтарды сұрыптау зауыттарында және өнеркәсіптік аймақтарда орналасуы мүмкін.

Қуаттылығы жылына 1 миллион тонна УТТ-3000 кешені 16,4 гектар аумақты алып жатыр. Кәсіпорынның ең төменгі рұқсат етілген санитарлық-қорғау аймағы қоршаудан 1 км арақашықтықта болады.

УТТ-500 кешенінің жалпы қоршалған аумағы 6,55 гектарды құрайды. Кәсіпорынның ең төменгі рұқсат етілген санитарлық-қорғау аймағы қоршаудан 1 км радиуста орналасқан.

Шикізаттың ылғалдылығы 12 % дейін болғанда кептіру қажет емес. Ылғалдылығы жоғары болған жағдайда шикізат алдын ала кептіріледі, бұл зауыттың шикізатты өңдеу қабілетін арттырады.

Нысанның жұмыс істеуі үшін келесі энергия ресурстары қажет:

- Электр қуатын және электр энергиясын тұтыну: сәйкесінше 6 237 кВт және 42,9 гВт/сағ. Міншікті тұтыну 1 тонна шикізатқа 40 кВт/сағ.

- Өндірістік объектілерді жылытуға және ыстық сумен жабдықтауға арналған жылу энергиясы.

- Айналымдағы техникалық сумен жабдықтау жүйесіндегі шығынның орнын толтыру үшін қажетті техникалық су: 16,5 м³/сағ.

Алғашқы екі ресурсқа сұраныс нысанның өз өндірісі арқылы қанағаттандырылады.

Осылайша, аталмыш нысандар қалдықтарды құнды ресурс ретінде тиімді өңдеуді үйлестіре отырып, тұрақты экономикалық даму ережелеріне сәйкес келетін ТҚК кәдеге жарату мәселесінің кешенді шешімі болып табылады.

Мақалада көрсетілген балқыту цехынан шығатын түтін газы және пирогендік ылғал сияқты бірнеше құрамдас бөліктер жоғары жылдамдықтағы пиролиз процесінде және материалды екінші рет қайта пайдалануда маңызды рөл атқарады.

Технологиялық үдеріс жұмысының функциялары төмендегідей болады:

- Балқыту цехы: балқыту цехындағы күл құм, темір және көмір сияқты қоспаларды балқыту үшін қолданылады. Бұл процесс бағалы материалдарды, соның ішінде феррокорытпаларды қалпына келтіруге, қалдықтардың түзілуін азайтуға және экономикалық айналым принциптерін қолдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, балқыту процесінде пайда болатын қалдық көміртек тотығы (СО) жылу қазандығына жіберіліп, жүйеге қосымша жылу энергиясын береді.

- Түтін газы: мұржа арқылы сыртқа шығатын түтін газы, бөлшектерді кептіру үшін электростатикалық тұндырғыш арқылы өтетін қалдық жылу қазандығынан шығатын түтін газы. Газды дұрыс өңдеу қоршаған ортаны қорғау ережелерін сақтауды қамтамасыз етеді және атмосфераға шығатын қалдықтарды азайтады.

- Пирогендік ылғал: бұл пиролиз реакторынан бу-газ қоспасын салқындату кезінде конденсация қондырғысында жиналған конденсацияланған су фракциясы. Ол термиялық ыдырау кезінде қалдық материалдан бөлінетін ылғалдан тұрады. Пирогенді ылғалдың жойылуы пиролиздің тиімділігін оңтайландыруға көмектеседі.

2.4. Элементтік талдау

Қатты және сұйық үлгілердің элементтік талдауы Multi EA® 5100 әмбебап анализаторының (Analytik Jena, Германия) көмегімен жүргізілді. Бұл құрал сұйық, қатты, паста тәрізді және мұнай, мұнай өнімдері және басқа да органикалық матрицалар үлгілеріндегі күкірт, хлор, азот және көміртек құрамын анықтауға мүмкіндік береді.

Үлгі массасы 10 мг-нан аспайды. Қатты үлгілер шарикті диірменде бөлшектер өлшемі <100 мкм болатындай етіп ұнтақталады. Сұйық үлгілер 5 минут шайқау арқылы гомогенизацияланды.

Құралды калибрлеу анықталатын әрбір элемент үшін сертификатталған анықтамалық материалдарды (CRMs) пайдалану арқылы орындалды. Калибрлеу қисықтары күкірт, азот, хлор үшін 0,001% - 10% және көміртегі үшін 0,1% - 50% концентрация диапазонында тұрғызылды. Бақылау үлгілерінің сапасы күнделікті талдау арқылы бақыланып отырады. Алынған нәтижелердің стандартты нәтижелерден салыстырмалы ауытқуы барлық анықталған элементтер үшін 2 %-дан аспады.

Барлық өлшеулер үш рет орындалды. Нәтижелерді статистикалық өңдеу OriginPro 2022 бағдарламалық құралын қолдану арқылы орындалды (OriginLab Corporation, АҚШ).

3. Нәтижелер

3.1. ТҚҚ құрамы

Зерттеуге Астана қаласындағы (Қазақстан) полигондарынан сынамалар алынды. ТҚҚ құрамын 1-кестеден көруге болады.

Кесте 1. Құрамындағы металды бөліп алғанға дейін және бөліп алғаннан кейінгі тұрмыстық қатты қалдықтардың (ТҚҚ) құрамы (% салмағы бойынша)

Компонент	Қағаздар	Тамақ қалдықтары	Сүйек	Ауладағы қалдықтар	Шыны	Тас	Түсті металдар	Қара металдар	Пол имерлер	Аккумуляторлар	Бығары, резеңке	Тоқыма бұйымдар	Ағаш	Керамика	Медициналық қалдықтар	Басқалар	Скрининг (16 мм-ден аз)	Барлығы
Металды бөліп алу алдындағы контент (%)	16,9	25,9	0,3	3,5	9,2	0,8	0,11	0,954	7,2	0,3	2,3	4,6	2,7	1,0	0,02	12,3	11,8	100,00
Металды бөліп алғаннан кейінгі құрамы (%)	17,05	26,1	0,34	3,56	9,26	0,84	0,03	0,29	7,22	0,33	2,36	4,59	2,73	1,07	0,02	12,37	11,86	100,00

Экстракциядан кейінгі құрам бөліктедің көпшілігінің пайыздарының шамалы жоғарылауын, яғни металдардың жойылуын көрсетеді. Мысалы, қағаздың үлесі 16,9%-дан 17,05%-ға, тамақ қалдықтарының үлесі 25,9%-дан 26,1%-ға өсті. Өте аз өзгерістер сүйек (0,3%-дан 0,34%-ға дейін), аула қалдықтары (3,5%-дан 3,56%-ға дейін) және шыны (9,2%-дан 9,26%-ға дейін) сияқты басқа металл емес компоненттерде байқалады.

Керісінше, түсті және қара металдардың үлесі айтарлықтай төмендеді. Түсті металдар 0,11%-дан 0,03%-ға, қара металдар 0,954%-дан 0,29%-ға дейін төмендеген, бұл олардың қалдықтардан сәтті тазарғанын көрсетеді. Былғары, резеңке, тоқыма, ағаш, керамика және әртүрлі бұйымдар сияқты басқа компоненттер де жалпы трендке сәйкес шамалы өсім көрсетті.

Тұтастай алғанда, деректер ТҚҚ-дан металдардың тиімді тазаруын көрсетеді, нәтижесінде металл құрамының азаюына байланысты металл емес құрамдас бөліктердің салыстырмалы үлесі шамалы артады.

Ленинград кен орнының жанғыш тақтатастарының және Астана полигондарының ТҚҚ-ның элементтік құрамын талдау олардың элементтік құрамы бойынша айтарлықтай сәйкестігін көрсетті. Олардың элементтік құрамы құрғақ қалдық массасы бойынша (% масса) келесідей: С – 23,01; Н₂ – 2,92; S (барлығы) – 0,12; О₂ – 14,97; N₂ – 0,53; Cl₂ – 0,10.

Ленинград кен орнының жанғыш тақтатастарының және Астана полигондарының ТҚҚ элементтік құрамының талдауы айтарлықтай ұқсастықтар мен айырмашылықтарды көрсетеді. Екі материалда да көміртегінің салыстырмалы құрамы бар, тақтатаc 23,41% және ТҚҚ 23,01%, бұл жану арқылы энергия өндірудің ұқсастығы барын көрсетеді. Сутегінің мөлшері де дерлік бірдей, тақтатаc 2,91% және ТҚҚ 2,92%, бұл олардың органикалық құрамдағы ұқсастығын көрсетеді.

Дегенмен, екі материалда да оттектен пен күкірт мөлшері айтарлықтай ерекшеленеді. ТҚҚ-та оттектің мөлшері 14,97%, бұл тақтатастағы 3,48%-бен салыстырғанда оттектің мөлшері әлдеқайда жоғары екенін білдіреді, бұл жану процесіне және шығарындылар профилине әсер етуі мүмкін. Керісінше, тақтатаc құрамында күкірттің жалпы мөлшері 1,64%, ал ТҚҚ небәрі 0,12%, бұл күкірт шығарындыларына қатысты қоршаған ортаға әсер етуі мүмкін. Азот пен хлордың деңгейі екі материалда да салыстырмалы түрде төмен, бірақ ТҚҚ тақтатастағы 0,15%-бен салыстырғанда 0,53% жоғары, ал хлордың мөлшері екеуінде де бірдей 0,1%. Бұл өзгерістер энергия көздері ретінде осы материалдарды пайдалану маңызды екенін көрсетеді.

Екі шикізаттың элементтік құрамының ұқсастығына сүйене отырып, тақтатастарды өңдеу үшін қолданылатын технологияны Астана қаласының полигондарының қалдықтарына және ТҚҚ-ға да қолдануға болады деген қорытынды жасауға болады. Бұл қалдықтарды өңдеу бойынша тиімдірек және экологияға зиян келтірмейтін жағдай жасауға мүмкіндіктер туғызады.

ТҚҚ-тағы және жанғыш тақтатастағы органикалық заттардың элементтік құрамының ұқсастығы пиролиз кезіндегі салыстырмалы ыдырау процесін және кейіннен бу-газ қоспасының түзілуін көрсетеді. Конденсация қондырғысында салқындату кезінде бұл қоспа синтетикалық мұнайдың, жартылай кокс газының және пироликалық ылғалдың сұйық фракцияларына бөлінеді. Бұл әрекет Фишер реторты және қатты жылу тасымалдауышпен қыздыру процесін модельдейтін зертханалық масштабты орнату арқылы жүргізілген ауқымды эксперименттер арқылы дәлелденді.

3.2. Өнімдерді қайта өңдеу

Қалдықтарды өңдеу процесі қатты тұрмыстық қалдықтарды қауіпсіз кәдеге жаратуды ғана емес, сонымен бірге қалдықтарды құнды өнімдерге айналдыруды да қамтиды. Қоқысқа тасталған қалдықтарды қайта өңдеу және кәдеге жарату процестері нәтижесінде түзілетін негізгі өнімдерге мыналар жатады:

- Синтетикалық сұйық отын: УТТ-3000 үшін 300-400 тонна/тәу (УТТ-500 үшін 50-70 тонна/тәу) – қазандық, пеш және басқа да отындар сияқты коммерциялық отынның әртүрлі

түрлерін алу үшін ауыр, орташа және бензин фракциялары әртүрлі пропорцияларда араластырылуы мүмкін.

- Электр қуаты: 50-90 мВт, оның ішінде ішкі қажеттіліктерге 6,5 мВт (УТТ-500 үшін – 6,7 есе аз). Электр энергиясын желіге беруге немесе күлді балқыту үшін пайдалануға болады.
- Жылу энергиясы: 70 мВт/сағ, УТТ-3000 үшін 1650 мВт/тәу (УТТ-500 үшін – 6,7 есе аз).
- Күл: тәулігіне 1400-2000 тонна, күлдің құрамына байланысты (күлділігі төмен болған жағдайда салқындатқыш ретінде құм немесе әктас қосуға болады) асфальт, бетон қоспаларымен ферроқорытпалар алу үшін қолданылады. Ылғалды қосқаннан кейін сақтаған кезде ол қатып, инертті материалға айналады.
- Сұрыпталған металдар: түстіметалдар (0,03%) және қараметалдар (0,3%).

Күлді кәдеге жарату болмаған жағдайда оның көлемі ТҚҚ жұмыс массасының 20-45%-ын немесе 600-1500 тонн/тәулігіне құрайды (УТТ-500 үшін 100-240 тонна/тәулігіне). Күл инертті газ және ылғал қосылып тығыздалған кезде қатаяды.

3.3. Технологиялық есептеулер

Алынған шикізат қоспасының құрамы қалдықтардың құрғақ массасы үшін өнімділігі 500 тонн/тәулігіне болатын қатты салқындатқышы бар УТТ-500 қондырғысында өңдеуге негізделген қалдықтардың түрлері бойынша жылдық кірістер есебінен алынды.

2, 3, 4-кестелерде қатты тұрмыстық қалдықтарды сұрыптау кезіндегі шикізат қоспаларының құрамы, олардың элементтік құрамы және пиролиз өнімдерінің шығымы көрсетілген.

Кесте 2. ТҚҚ компоненттерінің сипаттамасы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Қалдықтар салмағы, т/тәу	Ылғалдылық, %	Құрғақ масса, т/тәу	Қоспадағы мөлшері, %
Қағаз, картон	12 369	35,0	8 040	5,4
Шыны	6 023	-	6 023	4,0
Ағаш	2 126	43,0	1 212	0,8
Полимерлер	4 464	10,0	4 018	2,7
Алюминий	722	-	722	0,5
Тоқыма бұйымдар	32 176	30,0	22 523	15,0
Тағам қалдықтары	8 929	80,0	1 786	1,2
Мұнаймен майланған шпалдар	3 400	22,0	2 652	1,8
Мұнай шламы	7 500	25,8	5 569	3,7
Алынған қоспаның құрамы, %				
Жалпы қоспалар	77 708		52 543	35,0
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	139 224	30,0	97 457	65,0
Жалпы шикізат	216932	30,9	150000	100,0

Кесте 3. ТҚҚ компоненттерінің элементтік құрамы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Органикалық заттардың элементтік құрамы және құрамдас бөлігінің күлділігі, құрғақ массасы %					
	С	Н	О	N	S	Күл*
Қағаз, картон	43,6	5,8	44,4	0,3	0,2	5,7
Ағаш	49,1	5,9	41,0	0,2	0,1	3,9
Полимерлер	59,3	8,3	19,3	1,0	0,4	10,2
Тоқыма бұйымдар	53,5	6,5	30,7	4,6	0,1	4,6
Тағам қалдықтары	44,9	5,4	25,8	3,8	0,1	20,0
Мұнаймен майланған шпалдар	52,7	6,3	37,3	0,2	0,1	3,4
Мұнай шламы	51,40	8,68	1,93	0,56	0	37,4
Алынған қоспаның құрамы, %						
Жалпы қоспалар	15,7	2,1	8,9	0,8	0,08	7,5
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	10,9	1,4	3,3	0,2	0,1	49,1
Жалпы шикізат	26,62	3,44	12,22	0,96	0,18	56,5

Кесте 4. Пиролиз өнімдерінің шығымы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Пиролиз өнімінің шығымы, құрғақ салмағы %		
	Мұнай	Газ	Жартылай кокс
Қағаз, картон	16,62	16,16	36
Ағаш	16,62	16,16	36
Полимерлер	90	6,5	3
Тоқыма бұйымдар	47	19	30
Тағам қалдықтары	48	20	29
Мұнаймен майланған шпалдар	30	17	34
Мұнай шламы	34,1	9,3	43,3
Алынған қоспаның құрамы, %			
Жалпы қоспалар	12,9	4,9	9,4
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	4,6	5,2	54,6
Жалпы шикізат	17,50	10,14	64,00

Бұдан шикізаттың жалпы көлемін жылына 216 932 тоннаны құрайтынын, ылғалдылығы 30,9%, нәтижесінде 150 000 тонна құрғақ масса пайда болатынын көруге болады. Қағаз, картон және тоқыма бұйымдары ең үлкен бөліктерді құрайды, бұл қоспаның құрғақ массасына айтарлықтай үлес қосады. Элементтік құрам полимерлер мен майланған шпалдар сияқты материалдардағы көміртектің жоғары мөлшерін көрсетеді, бұл пиролиз арқылы энергияны қалпына келтірудің айтарлықтай әлеуетін көрсетеді.

Пиролиз өнімінің шығымы әртүрлі материалдарға байланысты өзгереді. Мысалы, полимерлер 90% құрғақ салмақта майдың жоғары шығымдылығын көрсетеді, ал әйнектен май алынбайды, бірақ процесте инертті болып қалады. Тоқыма және тамақ қалдықтары да сәйкесінше 47% және 48% деңгейінде майдың шығымдылығын көрсетеді. Жалпы қоспа қоспасы барлық шикізаттың 35%-ын құрайды, күлдің мөлшері 7,5% құрайды, бұл түпкілікті құрамға және өнім шығымына әсер етеді.

Жалпы алғанда, талдау 50/50 қатынасы бар ТҚҚ және күл қожының қоспасы пиролиз процесіне әсер ететін 49,1% күлділікке ие екенін көрсетеді. Шикізат құрамының әртүрлі болуы мұнайдың, газдың және жартылай кокстың әртүрлі шығымдылығына әкеледі, бұл

энергияны қалпына келтіру және қалдықтарды азайту үшін пиролиз процесін оңтайландырудың жетістігін көрсетеді.

Алынған қоспа үшін жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және 1 тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауы кезіндегі бөлінетін жылу мөлшері анықталды (5-кесте).

Кесте 5. Жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және 1 тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауы кезіндегі бөлінген жылу мөлшері

Параметрлері/Өнімдер			Мұнай	Газ	Пирогендік ылғал	Жалпы ұшпа заттар	Кокс қалдығы	Барлығы
Өнімнің жану жылуы, кДж/кг	Ең жоғарғы		38064,56	39385,04	-	-	1893,42	-
	Ең төменгі		35848,97	35871,75	2512,00	-	1871,23	-
Өнімдердің салмақ шығымы, кг/т			175,00	101,40	7,10	283,50	716,50	1000,00
1 тонна құрғақ шикізатқа есептелген ықтимал жылу, мДж/т	Ең жоғарғы	мДж/т	6661,30	3993,64	-	10 654,94	1 356,64	12041,96
		%	55,32	33,16	-	88,48	11,27	99,75%
	Ең жоғарғы	мДж/т	6273,57	3637,40	17,84	9 928,80	1340,73	11264,25
		%	55,69	32,29	0,16	88,14	11,90	100,05%

5-кестеде жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және бір тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауынан түзілетін жылу мөлшері көрсетілген. Осыдан өнімдердің, әсіресе мұнай мен газдың жану жылуының айтарлықтай жоғары екенін көруге болады, ең жоғары мәндері мұнай өнімі үшін шамамен 38 065 кДж/кг және газ үшін 39 385 кДж/кг жетеді. Мұнайдың салмақтық шығымы тоннасына 175 кг құрайды. Оның ең жоғары мәні 6661,30 мДж/т потенциалдық жылуды қамтамасыз етеді, бұл жалпы энергия шығымының жартысынан астамын құрайды. Газ да тоннасына 101,40 кг энергия өндіруге үлес қосады, бұл жалпы жылу мөлшерінің шамамен үштен бір бөлігін құрайды, 3993,64 мДж/т.

Пирогендік ылғалдылық 7,10 кг/т салмағы бойынша минималды болса да, жалпы жылу бөлуге аз әсер етеді. Салмағы 716,50 кг/т болатын кокс қалдығында тооннасына бөлінетін жылу мөлшері өте аз. Оның бөлетін жылуының ең жоғары мөлшері 1356,64 мДж/т.

Мұнай мен газды қоса алғанда, жалпы ұшпа заттар 283,50 кг/т құрайды және жалпы жылудың 88,48 % мөлшерін құрайды, бұл олардың шикізат қоспасы арқылы энергияны қалпына келтіру процесіндегі маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Жалпы алғанда, 5-кестеде шикізаттың термиялық ыдырау процесінде бөлінген жылуды энергияға айналдырудың тиімділігі жоғары екенін білдіреді. Жылудың көп бөлігі мұнай мен газ өндіруден алынады, бұл жылу оларды жартылай кокстеу процесінде түзілетінін білдіреді.

Пиролиз нәтижесінде түзілген өнімдерден 1 тонна құрғақ массаға шаққандағы алынған қоспа үшін органикалық заттардың құрамындағы элементтердің мөлшері анықталды (6-кесте).

Кесте 6. 1 тонна құрғақ шикізат қоспасынан пиролиз өнімдеріндегі химиялық элементтердің таралуы

Атауы/элементтер	Күл	S	C	H	N	O	Жалпы
Құрғақ шикізат	кг	565,4	2,20	266,20	34,40	9,60	1000
	%	56,54	0,22	26,62	3,44	0,96	100
Май	кг	-	0,09	138,67	17,15	1,05	175,00
	%	-	0,05	79,24	9,80	0,60	100,00
Газ	кг	-	-	65,78	15,76	-	101,40
	%	-	-	64,87	15,54	-	100,00
Жартылай кокс	кг	565,40	2,11	61,75	0,70	8,55	77,98
	%	78,91	0,29	8,62	0,10	1,19	10,88
Ылғал	кг	-	-	-	0,79	-	7,10
	%	-	-	-	11,11	-	100,00

Күлдің басым бөлігі, яғни 565,40 кг, жартылай кокстеу өнімдерінің жалпы массасының 78,91%-ын құрайды. Күкірт аз мөлшерде болса да, негізінен жартылай кокстеу өнімдерінде (2,11 кг) және мұнайда (0,09 кг) кездеседі. Көміртектің таралуы мұнайға (138,67 кг) және газға (65,78 кг) бөлінген үлестің айтарлықтай көп мөлшерін иеленеді. Олар сәйкесінше 79,24% және 64,87 % құрайды, бұл пиролиз процесінде олардың көміртекті тасымалдаушылардың негізгісі екенін көрсетеді. Сутек негізінен мұнай мен газда көптеп кездеседі, оның мөлшері мұнайда 17,15 кг (9,80%) және газда 15,76 кг (15,54%) болады. Азот негізінен жартылай кокста (8,55 кг) кездеседі, оның массасы 1,19% құрайды. Оттегінің мөлшері газда 19,86 кг және жартылай кокста 77,98 кг, бұл сутек пен азотқа қарағанда айтарлықтай жоғары, олардың массасы сәйкесінше 19,59% және 10,88% құрайды. Ылғалдылықтың элементтік құрамының көп бөлігі, дерлік оттектен (88,89 %) және сутектен (11,11%) тұрады.

Жартылай кокстің көп мөлшерін күл мен күкірт иеленетінін, ал мұнай мен газ сутек пен көміртектен тұратынын көруге болады. Жартылай кокстегі күл мен күкірт тәрізді жанама өнімдерді анықтай отырып мұнай мен газ құрамындағы бағалы энергия көзі бола алатын компоненттерді шоғырландыруда пиролиз процесінің тиімді екені белгілі болды. Шикізат пен пиролиз өнімдерінің жану жылуы жүргізілген тәжірибелер көмегімен анықталды (7-кесте).

Кесте 7. Шикізат пен пиролиз өнімдерінің жану жылуы

Атауы/ Параметрлер	Жоғары жану жылуы, Q_H , кДж/кг	Төменгі жану жылуы, Q_I , кДж/кг	Жоғары жану жылуы, Q_H , ккал/кг	Төменгі жану жылуы, Q_I , ккал/кг
Құрғақ шикізат	12 042	11 264	2 876	2 690
Мұнай	38 065	35 849	9 092	8 562
Газ	39 385	35 872	9 407	8 568
Жартылай кокс	1 893	1 871	452	447

Мұнай мен газда жану жылуы өте жоғары, мұнайда 38 065 кДж/кг, ал газда 39 385 кДж/кг, шикізаттың жану жылуы 12 042 кДж/кг және жартылай кокстың жану жылуы 1893 кДж/кг. Мұнай мен газ үшін ең төменгі жылу мәндері шикізат пен жартылай коксқа қарағанда айтарлықтай жоғары. Мұнай мен газ өнімдерін пиролиз процесі кезінде түзілген энергияны шоғырландыру тиімді екенін және оларды энергия көзі ретінде пайдалануға болатынын білдіреді. Алынған деректер пиролиз өнімдерінің, атап айтқанда мұнай мен газдың бастапқы шикізат пен жартылай коксқа қарағанда энергетикалық шығымы жоғары екенін көрсетеді.

Әртүрлі жағдайда әртүрлі негіздегі жану жылуы мен шикізаттың құрамы анықталды (8-кесте).

Кесте 8. Шикізаттың құрамы және жану жылуы

Атауы	W	A	S	C	H	N	O	Жалпы	Жану жылуы Q, кДж/кг	
									Жоғарғы	Төменгі
Жұмыс салмағына, %	20,98	44,68	0,17	21,03	27,72	0,76	9,66	100,00	9 515	8 374
Аналитикалық салмағына, %	2,2	55,30	0,22	26,03	3,36	0,94	11,95	100,00	11 777	10 961
Құрғақ салмақ, %	-	56,54	0,22	26,62	3,44	0,96	12,22	100,00	12 042	11 264
Жанғыш массасы бойынша, %	-	-	0,51	61,25	7,92	2,21	28,12	100,00	27 708	25 919
Органикалық заттарда (құрғақ күлсіз заттарда), %	-	-	-	61,56	7,96	2,22	28,26	100,00	27 794	25 995

Орташа желдеткіші бар жабық қоймада сақталған ылғалдылығы 21%-ға дейін кептірілген 1 тонна шикізат үшін материалдық және жылу балансының мәні 9-кестеде келтірілген.

Кесте 9. 1 тонна шикізат үшін материалдық және жылу балансы

Параметрлері	Шығымы					Шығымы						
	Ауа	Шикізат ¹	Су	Иіс газы ²	Жалпы	Ылғал ³	Газ ⁴	Күл	Бу	Май	Жалпы	%
Салмағы, кг	2160	1000	1429	68	4656	6	2669	444	1429	108	4656	100
Физикалық жылу, ГДж	0,181	0,015	0,615	0,04	0,85	0,019	0,918	0,038	4,727	0,011	5713	51,08
Химиялық жылу, ГДж	-	9,515	-	0,82	10,34	-	-	-	-	3,882	3,882	34,70
Жылудың жалпы мөлшері, ГДж	-	-	-	-	11,19	-	-	-	-	-	9,595	85,78
Жылуды тұтыну, ГДж	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,59	14,22

¹ылғалдылығы 21%;

²балқыту цехынан;

³пирогенетикалық;

⁴түгін

9-кестеде салмақ, физикалық жылу, химиялық жылу, жалпы жылу және жылу шығыны бойынша кіріс пен шығысты көрсететін бір тонна шикізаттың материалды-жылу балансының егжей-тегжейлі бөлінуі берілген. Кірістерге ауа, 21% ылғалдылығы бар шикізат, су және балқыту цехының СО газы кіреді, жалпы салмағы 4,656 кг. Жалпы жылу шығыны 11,19 гДж құрайды, оның басым бөлігі шикізаттың химиялық жылуы есебінен (9,515 гДж). Сонымен қатар су физикалық жылуды айтарлықтай көбейтеді (0,615 гДж).

Пиролиз процесі өнімдерінің шығысына пирогендік ылғал, түтін газы, күл, бу және мұнай жатады. Шығарылатын заттардың жалпы салмағы кірістерге сәйкес келеді, бұл процестің кіретін және шығатын өнімдерінің салмағының бірдей болуы масса сақталу заңына сәйкес келеді. Жалпы жылу шығару 9,595 гДж, ең үлкен үлесті бу (физикалық жылу 4,727 гДж) құрайды. Түтін газы сонымен қатар жылудың айтарлықтай мөлшерін (0,918 гДж физикалық жылу) иеленеді. Процестің жалпы жылу тиімділігі жоғары, енгізілетін өнімдерден алынатын жылудың 85,78%-ы шығарылатын өнімдерге пайдаланылады, ал жылудың 14,22%-ы тұтынуды құрайды, бұл пиролиз процесінің жылуын энергия көзі ретінде пайдаланудың тиімді екенін көрсетеді. Бұл теңгерім энергияны тұтынуды тиімді қолдана отырып, шикізатты бағалы жанама өнімге түрлендірудің тиімділігін ұсынады.

10-кестеде бу, май және электр энергиясының шығымына назар аударып, пиролиз жүйесінің технологиялық тиімділігі берілген.

Кесте 10. Процестің тиімділігін есептеу

Параметрлері/өнімнің шығымы	Бу	Май	Электр энергиясы, МВтч	Барлығы (бу, май)	Химиялық тиімділігі (май)	Энергиялық тиімділігі УТТ (бу, май)	Турбогенератордың тиімділігі (будың қуаттылығы)
Салмағы, кг	1428,5	108,3	393,9	-	-	-	-
Жылу, ГДж	4,727	3,882	1,418	8,609	-	-	-
Тиісінше, %	45,7	37,6	13,7%	83,29	37,56	83	30

Өндірілетін жылудың басым бөлігі бу мен мұнайдан алынады, будың үлесі 4,727 гДж және мұнайдың үлесі 3,882 гДж, сәйкесінше жалпы үлестің 45,7% және 37,6% құрайды. 393,9 кг шикізаттан өндірілетін электр энергиясы жалпы жылу үлесінің 13,7%-ын құрайды, ол 1,418 гДж болады. Бу мен мұнайдан алынған жылу шығымын біріктірген кезде 8,609 гДж құрайды, бұл жалпы қажетті жылудың 83,29%-ы. Сондай-ақ кестеде мұнайдың химиялық тиімділігі 37,56% және бу мен майға арналған УТТ көрсеткіштері жүйесінің энергия тиімділігі 83% болатыны көрсетілген. Бұл мәндер ТҚҚ өңдеу процесінде алынған жылу мөлшерін энергия көзі ретінде қолданудың тиімді екенін дәлелдейді.

4. Талдау

Пиролиз процесінің қалдықтарды тікелей жағудан айырмашылығы, диоксиндердің (тетрахлордibenзо-р-диоксиндер) түзілуіне жол бермейді. Бұл күрделі процестерге қойылатын талаптарды айтарлықтай төмендетеді. Қалдықтарды жағу кезінде хлор, оттегі және бензол жану камерасында бірге сақталады, бұл диоксиндердің – өте улы қосылыстардың түзілуіне әкеледі. ЕО-ның қалдықтарды жағу жөніндегі директивасы диоксиндердің ыдырауын қамтамасыз ету үшін түтін газдарын 1200°C температурада кем дегенде 2 секунд ұстауды қажет. Осыдан кейін газды бөлу мен тазартудың, сондай-ақ бөлінген газдарды салқындатудың жетілдірілген жүйесіне жіберу қажет.

Мысалы, түтін газының жылдамдығы 50-100 м/с болғанда, өртеу қондырғысының ұзындығы 100-200 метрді құрауы керек, бұл қосымша отын мен ауаны беруді қажет етеді.

Сонымен қатар, өртеу қондырғысы мен газды бөлу жүйесінің ішкі беттері қымбат бағалы отқа төзімді материалдармен қапталуы керек, бұл айтарлықтай көп шығындарға әкеледі.

Пиролиз реакторында хлор мен бензол болғанымен, диоксин синтезіне жол беретін оттек жоқ. Пиролиз процесінде түзілген бензол реактордан бу-газ қоспасымен бірге шығарылады. Содан кейін алынған жартылай кокс ауа-фонтанды пешке жіберіледі, онда хлор мен оттек бар, бірақ бензол жоқ. Ауа-фонтанды пеште хлор кальциймен байланысып, зиянсыз кальций хлоридін (CaCl_2) түзеді, содан кейін ол күлмен бірге жойылады. Демек, диоксиндерді ыдырату үшін қымбат құрал-жабдықтардың қажеті жоқ.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың басқа технологияларынан біздің ұсынып отырған технологиямыздың төмендегідей артықшылықтары бар:

1. Меншікті өнімділігі жоғары (шикізат негізінде жылына 200 мыңнан 1,5 млн тоннаға дейін).
2. Пеште бұдан бұрын болған және жаңадан келіп түскен қатты қалдықтардың, өндірістік қалдықтардың, шламдар мен шөгінділердің алуан түрін әртүрлі қоспалар мен пропорцияларда өңдеуге болады.
3. Қалдықтардың барлығын қайта өңдеуге болады (қалдықсыз технология).
4. ТҚҚ-ды қайта өңдеу алдында сұрыптау талап етілмейді, тек қара және түсті металдар бөлінеді.

Пиролиз процесін жүргізудің қалдықтарды тікелей жағудан айырмашылығы диоксиндердің (тетрахлордидбензодиоксиндердің) түзілуін болдырмайды. Бұл күрделі шығындардың көлемін бірнеше есе азайтады. Технологиялық процесс басқа өндірушілердің энергия тасымалдаушыларын талап етпейді. Процестің жеке қажеттіліктері қалдықтардың ықтимал жылуымен жабылады.

Шикізатты жеткізу жүйесіне орташа деңгейдегі жабық қойма, шикізатты ұсақтау/ұнтақтау, электромагниттік сепаратор арқылы қара металдарды шығару, құйынды ток сепараторы арқылы түсті металдарды бөлу және өңделген қалдықтарды әктаспен бірге ыстық күл араластырғышқа беру кіреді.

Өндірістің экологиялық көрсеткіштері ЕО талаптарына сәйкес келеді (мысалы, 3 қондырғы УТТ-3000 Кохтла-Ярве қаласында орналасқан, 2 қондырғы УТТ-500 Кивинемесе Эстонияда). Viru Keemia Grupp AS үш қондырғыны басқарады, ол Petroter Эстонияның Кохтла-Ярва қаласында. Бұл нысандар ЕО-тың экологиялық ережелеріне және «Эстониядағы жанғыш тақтатастарды өңдеудің ең тиімді технологиялары» анықтамалық құжатына сәйкес келеді (ВАТ) (Molis A. және т.б., 2018).

Кесте 11. Бір қондырғыдан атмосфераға тікелей түсетін жылдық шығарындылар

Шығарындылар	NO_2	CO	CO_2	SO_2
Түтін газдарындағы орташа концентрация, мг/м^3	186,1	179,8	208 826	691,7

Қалдықсыз технология – барлық пиролиз өнімдері коммерциялық (сұйық отын, электр және жылу энергиясы, күл) немесе технологиялық процесте (пиролиз газы, пиролиз процесінің артық жылуы) қолданылады. Алынған күл инертті болып табылады және құрылыс материалдарын, асфальтты, тыңайтқыштарды, ал балқыту кезінде одан ферроқорытпаларды және кальцийкарбидін алуға болады.

Ондаған миллион тонна қатты тұрмыстық қалдықтар, сондай-ақ қатты тұрмыстық қалдықтарды сұрыптаудан кейінгі «қалдық қоймалары» орналастырылған Астана қаласындағы (Қазақстан) өндірістік және ТҚҚ кәдеге жарату мүмкіндіктеріне ерекше назар аудару қажет. Жасалған технологиялық сұлбалар зауыт жұмысының тиімділігіне және жылу мен электр энергиясын тұтынудың маусымдық өзгерістеріне, қазандықтың сұйық отынына,

күл, өңдеу өнімдеріне (құрылыс материалдарына, феррокорытпаларға, асфальтбетон қоспаларына, тротуар плиталарына және т.б.) сұраныстың өсуіне жауап береді. Муниципалдық аумақтарда мұндай қондырғыларды салу (тәулігіне 500 т.) энергияның сарқылмайтын көзінің пайда болуына («қалдықтардан энергияға»), жылу мен электр энергиясына сұранысты қанағаттандыруға көмектеседі, осылайша жылыту маусымына отынды сатып алу және сақтау шығындарын азайтады және энергия құнын төмендетеді. Қалдықтарды энергия қажеттіліктерін жабу үшін пайдалану табиғи газды, көмірді және сұйық отынды қолданудың қажеттілігін болдырмайды. Артық жылу энергиясын жеміс-көкөніс өсіруге және кәсіпкерлікке арналған жылыжай шаруашылықтарын дамытуға пайдалануға болады. Қолданыстағы және жабылған полигондардағы бұрын жинақталған өнеркәсіптік және ТҚК жою, қалдықтардың санитарлық-қорғау аймақтарын алып жатқан жерлерді босатуға, бұрынғы полигондар астындағы топырақты тазартуға және залалсыздандыруға, бұл жерлерді шаруашылық иелігіне қайтаруға мүмкіндік береді.

УТТ қондырғыларының жұмысына қажетті барлық жабдықтарды Қазақстанда шығаруға болады. Қазақстанда жергілікті өндірілген жабдықты пайдалана отырып, УТТ нысандарын құру, ел үшін бірқатар экономикалық және стратегиялық артықшылықтарға жол ашады. Біріншіден, жергілікті өндірушілер арасындағы ынтымақтастық, көлік шығындары мен кедендік төлемдерді азайтуға мүмкіндік береді, осылайша жобаның экономикалық тиімділігін арттырады. Қазақстанда УТТ нысандарын орналастыру нәтижесінде туындайтын логистикалық шығындардың төмендеуі жобаның жалпы құнына қолайлы әсер етеді. Екіншіден, қазақстандық техниканы пайдалану Қазақстандағы әр түрлі аймақтар арасындағы экономикалық байланысты нығайтуға қызмет етеді. Мұндай ынтымақтастық өзара инвестицияларға, технологиялық алмасуға және Қазақстанда жаңа жұмыс орындарын құруға әкелуі мүмкін. Мұндай жобалар жергілікті өнеркәсіптің дамуына ықпал етеді және бірлескен кәсіпорындар құруды ынталандыруы мүмкін. Сол арқылы Қазақстан экономикасын әртараптандыруға ықпал етеді. Қорытындылай келе, құрал-жабдықтарды өндіру мүмкіндігі Қазақстанға УТТ нысандарын құру жобаларын жедел және тиімді бастауға мүмкіндік береді. Елде жоғары сапалы жабдықты шығару үшін қажетті тәжірибе мен технология бар, осылайша зауыттардың сенімділігі мен тиімділігіне кепілдік береді. Бұл өз кезегінде Қазақстанның энергетикалық тәуелсіздігін арттыруға және ел үшін аса маңызды стратегиялық маңызы бар өнеркәсіптерді құруға қызығушылық тудырады.

УТТ қондырғыларын салу және пайдалану полигондардан парниктік және полигон газдарының атмосфераға шығарындыларын, жер асты суларының ластануын, қоршаған ортаға зиянды заттардың түсуін азайтады. УТТ технологиясы газ шығарындыларын азайту үшін қолданылатын басқа технологиялармен толық үйлеседі, қоқыс газдарын жинау үшін полигондарды гео-пленкалармен жабуды, рекультивациялауды және иістерді жою үшін полигондарды әктас және топырақ қабаттарымен жабуды жоққа шығармайды. УТТ негізіндегі қалдықтарды өңдейтін зауыттардың экономикалық тиімділігі жоғары. Қазақстанда мұндай зауыттар желісін дамыту жобалық қаржыландыру қағидаттары бойынша салынған зауыттар қалыптастыратын ақша ағындары есебінен жүзеге асырылуы мүмкін.

5. Қорытынды

Осы зерттеу жұмысы бойынша алынған нәтижелер ТҚК өңдеуді жақсарту үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясының маңызды екенін көрсетеді. Біздің жан-жақты техно-экономикалық талдауымыз бұл әдістің дәстүрлі өртеуден айтарлықтай артықшылықтары бар екенін көрсетеді, соның ішінде зиянды шығарындыларды азайтуды және әртүрлі қалдықтарды өңдеуде үлкен икемділік беретінін көрсетеді. Жылдам пиролиз процесі қалдықтарды синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясы, құрылыс материалдары және феррокорытпалар сияқты құнды өнімдерге тиімді түрлендіреді, ресурстарды қайта пайдалануға және энергия өндіруге ықпал етеді.

Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технологияның ТҚҚ өңдеуге сәтті бейімделуі, оның сенімділігі мен тиімділігін көрсетеді. УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының пайдалану көрсеткіштері, қондырғылардың қоршаған ортаға тигізетін әсерін барынша азайта отырып, өздерінің энергия қажеттіліктерін қанағаттандыра алатынын көрсетеді. Алынған нәтижелер қала маңындағы қалдықтарды жою бойынша ең басты маңызды мәселелерді шешу үшін қалдықтарды өңдеудің озық технологияларын енгізудің маңыздылығын атап көрсетеді.

Қорытындылай келе, қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы ТҚҚ өңдеуге перспективалы және тұрақты балама болып табылады. Оның бірнеше құнды өнімдерді шығару және экономикалық жағынан тиімділігі, оны қалдықтарды өңдеудің заманауи жүйелері үшін көп жылдар бойы қолдауға болатынын дәлелдейді. Болашақ зерттеулер мен әзірлемелер осы технологияны одан әрі оңтайландыруға және қалдықтарды өңдеудің жалпы тиімділігі мен экологиялық тұрақтылықты арттыру үшін осы процесті қалдықтардың басқа түрлерінеде қолдануды зерттеуге бағытталуы керек.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация – Е.А.; әдістеме – Н.Н.; бағдарламалық қамтамасыз ету – А.К., Л.К., Т.М.; тексеру – Ж.И., Н.Н.; формальды талдау – Ж.И., А.К.; тергеу – Ж.И.; ресурстар – Ж.И.; деректер кураторы – А.К.; жазу – түпнұсқа жоба – Р.С., Е.А.; жазу – рецензиялау және редакциялау – А.К., Ж.И., Е.А., Н.Н.; визуализация – Ж.И., Н.Н.; қадағалау – Е.А.; жобаны басқару – Е.А.; әдістеме – Н.Н.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Е.А.; қаржыландыруды сатып алу – Е.А.

8. Автор туралы ақпарат

Айбульдинов Еламан Канатович – бас ғылыми қызметкер, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты; Ғылым және сыртқы байланыстар жөніндегі проректор, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; elaman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9143-4581>

Нургалиев Нуркен Утеуович – қауымдастырылған профессор (доцент), «К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, химия, химиялық технология және экология кафедрасы, К.Мухаметханов көш. 37 А, Астана, Қазақстан, 010008; nurgaliev_nao@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9171-2238>

Сафаров Руслан Заирович – зерттеуші-оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; safarov_rz@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2158-6330>

Искакова Жанар Бактыбаевна – директор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; iskakova_zhb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4434-0707>

Колпек Айнагул – доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; kolpek_a@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6188-6229>

Машан Тогжан Тургалиевна – профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; mshan_tt@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7598-1956>

Кусепова Лязат Аманжоловна – доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; kusepova_la@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6457-0999>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № BR21882171).

10. Алғыстар: Біз ConsultTech ЖШС, Роман Ладуренко директоры атынан, зерттеудегі технологиялық есептеулердің кәсіби консалтингтік барысы үшін шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді. Демеушілер зерттеуді әзірлеуде ешқандай рөл атқарған жоқ; деректерді жинауда, талдауда немесе түсіндіруде; колжазбаны жазуда; немесе нәтижелерді жариялау туралы шешім қабылдауда.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Asadullah, M., Ab Rasid, N. S., Kadir, S. A., & Azdarpour, A. (2013). Production and detailed characterization of bio-oil from fast pyrolysis of palm kernel shell. *Biomass and Bioenergy*, 59, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.037>
2. Asif, M., Laghari, M., Abubakar, A. M., Suri, S. K., Wakeel, A., & Siddique, M. (2025). Review on Municipal Solid Waste, Challenges and Management Policy in Pakistan. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 43(4), 249–258. <https://doi.org/10.4152/pea.2025430404>
3. Assi, A., Bilo, F., Zanoletti, A., Ponti, J., Valsesia, A., La Spina, R., Zacco, A., & Bontempi, E. (2020). Zero-waste approach in municipal solid waste incineration: Reuse of bottom ash to stabilize fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118779>
4. Cui, W., Wei, Y., & Ji, N. (2024). Global trends of waste-to-energy (WtE) technologies in carbon neutral perspective: Bibliometric analysis. *Ecotoxicology and environmental safety*, 270, 115913. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115913>
5. Farzadkia, M., Mahvi, A. H., Norouziyan Baghani, A., Sorooshian, A., Delikhoon, M., Sheikhi, R., & Ashournejad, Q. (2021). Municipal solid waste recycling: Impacts on energy savings and air pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 71(6), 737–753. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1883770>
6. Gerasimov, G., Khaskhachikh, V., Potapov, O., Dvoskin, G., Kornileva, V., & Dudkina, L. (2019). Pyrolysis of sewage sludge by solid heat carrier. *Waste Management*, 87, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.016>
7. Guan, D., Zhao, J., Wang, Y., Fu, Z., Zhang, D., Zhang, H., Xie, J., Sun, Y., Zhu, J., & Wang, D. (2024). A critical review on sustainable management and resource utilization of digestate. *Process safety and environmental protection*, 183, 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.029>
8. Kasiński, S., & Dębowski, M. (2024). Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Source: Advances in Thermochemical Conversion Technologies and Environmental Impacts. *Energies*, 17(18), 4704. <https://doi.org/10.3390/en17184704>
9. Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., & Thierry Michel Rene, M. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
10. Kowalski, Z., Makara, A., Kulczycka, J., Generowicz, A., Kwaśnicki, P., Ciuła, J., & Gronba-Chyła, A. (2024). Conversion of Sewage Sludge into Biofuels via Different Pathways and Their Use in Agriculture: A Comprehensive Review. *Energies*, 17(6), 1383. <https://doi.org/10.3390/en17061383>

11. Kumar, R., Sharma, S., Kumar, A., Singh, R., Awwad, F. A., Khan, M. I., & Ismail, E. A. A. (2024). Sustainable energy recovery from municipal solid wastes: An in-depth analysis of waste-to-energy technologies and their environmental implications in India. *Energy Exploration & Exploitation*, 43(1), 3–28. <https://doi.org/10.1177/01445987231210323>
12. Li, N., He, M., Lu, X., Yan, B., Duan, X., Chen, G., Wang, S., & Hou, L. (2022). Municipal solid waste derived biochars for wastewater treatment: Production, properties and applications. *Resources conservation and recycling*, 177, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106003>
13. Liang, Y., Xu, D., Feng, P., Hao, B., Guo, Y., & Wang, S. (2021). Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126456>
14. Liu, J., Kua, H. W., Wang, C.-H., Tong, Y. W., Zhang, J., & Peng, Y. (2023). Improving urban ecosystem holistic sustainability of municipal solid waste-to-energy strategy using extended exergy accounting analysis. *Science of the Total Environment*, 904, 166730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166730>
15. Louzizi, T., Chakir, E., & Sadoune, Z. (2024). A comprehensive review on solid waste management in Morocco: Assessment, challenges and potential transition to a circular economy. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00662-5>
16. Ma, J., & Hipel, K. W. (2016). Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe - A systematic literature review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 56, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.041>
17. Moradi, R., Yazdi, M., Haghghi, A., & Nedjati, A. (2024). Sustainable resilient E-waste management in London: A circular economy perspective. *Heliyon*, 10(13), e34071. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34071>
18. Narayana Sarma, R., & Vinu, R. (2023). An assessment of sustainability metrics for waste-to-liquid fuel pathways for a low carbon circular economy. *Energy Nexus*, 12, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100254>
19. Nassajfar, M. N., Abdulkareem, M., Horttanainen, M. (2024). End-of-life options for printed electronics in municipal solid waste streams: A review of the challenges, opportunities, and sustainability implications. *Flexible and Printed Electronics*, 9(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ad699b>
20. Potapov, O. P. (2016). Experience and prospects of oil shale utilization for power production in Russia. *Thermal Engineering*, 63(9), 643–647. <https://doi.org/10.1134/S0040601516080097>
21. Potapov, O. P., Khaskhachikh, V. V., Gerasimov, G. Y. (2017). State-of-the - Art technologies of oil shale thermal processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 891, 12236. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012236>
22. Rauch, R., Kiros, Y., Engvall, K., Kantarelis, E., Brito, P., Nobre, C., Santos, S. M., & Graefe, P. A. (2024). Hydrogen from Waste Gasification. *Hydrogen*, 5(1), 70–101. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5010006>
23. Razzak, S.A. (2024). Municipal Solid and Plastic Waste Co-pyrolysis Towards Sustainable Renewable Fuel and Carbon Materials: A Comprehensive Review. *Chemistry-an asian journal*, 19(17), e202400307. <https://doi.org/10.1002/asia.202400307>
24. Ren, Z., & Zuo, G. (2024). Challenges of Implementing Municipal Solid Waste Separation Policy in China. *Sustainability*, 16(18), 8081. <https://doi.org/10.3390/su16188081>
25. Sarker, T. R., Ethen, D. Z., Asha, H. H., Islam, S., & Ali, Md. R. (2024). Transformation of municipal solid waste to biofuel and bio-chemicals - A review. *International journal of environmental science and technology*, 22, 3811–3832. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05975-0>
26. Sharma, P., Bano, A., Singh, S. P., Varjani, S., & Tong, Y. W. (2024). Sustainable Organic Waste Management and Future Directions for Environmental Protection and

- Techno-Economic Perspectives. *Current Pollution Reports*, 10(3), 459–477. <https://doi.org/10.1007/s40726-024-00317-7>
27. Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>
28. Tugov, A. N., Ots, A., Siirde, A., Sidorkin, V. T., & Ryabov, G. A. (2016). Development of measures to improve technologies of energy recovery from gaseous wastes of oil shale processing. *Thermal Engineering*, 63(6), 430–438. <https://doi.org/10.1134/S0040601516060082>
29. Vanchurin, V., Wolf, Y. I., Katsnelson, M. I., & Koonin, E. V. (2022). Toward a theory of evolution as multilevel learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(6), e2120037119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120037119>
30. Vinnichenko, V., Shul'Ga, I., & Saffioti, P. (2023). *Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste*, 2490(1), 050006. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
31. Volkov, E.P., & Stelmahh, G.F. (1999). The Stages of Research on Creating Commercial Units for Processing Oil Shale Fines: Development of the “Galoter” Process in 1944–1999. *Oil Shale*, 16(2), 161–185. <https://doi.org/10.3176/oil.1999.2.08>
32. Vukovic, N., & Makogon, E. (2022). Waste-to-Energy Generation: Complex Efficiency Analysis of Modern Technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21), 13814. <https://doi.org/10.3390/su142113814>
33. Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of cleaner production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
34. Yorgun, S., & Yildiz, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.003>
35. Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., Tsang, D. C. W. (2021). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125132. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125132>
36. Zhou, W., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J., & Zhang, P. (2024). A review of existing methods for predicting leachate production from municipal solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(11), 16131–16149. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32289-y>

Fast Pyrolysis Technology with Solid Heat Carrier for Municipal Solid Waste Processing

Yelaman Aibuldinov, Nurken Nurgaliev, Ruslan Safarov, Zhanar Iskakova, Ainagul Kolpek, Togzhan Mashan, Lyazat Kusepova

Abstract: Municipal solid waste (MSW) recycling is critical in addressing the environmental challenges posed by increasing urbanization and waste generation. This study explores the use of fast pyrolysis technology with solid heat carriers for efficient MSW processing. The technology, originally developed for oil shale processing, involves the thermal decomposition of waste in an oxygen-free environment using its own ash as a heat carrier. This method produces valuable outputs, including synthetic oil, gas, thermal and electrical energy, construction materials, and ferroalloys. The study conducts a comprehensive techno-economic analysis of fast pyrolysis plants with

capacities of 150 000 tons/year (UTT-500) and 1 000 000 tons/year (UTT-3000), assessing their technical feasibility, economic viability, and environmental performance. Results indicate that this technology can significantly reduce harmful emissions compared to traditional incineration and offers greater versatility in processing various waste types. The findings support the potential of fast pyrolysis to enhance MSW management, aligning with circular economy principles and contributing to sustainable waste management practices. This research underscores the need for innovative solutions to improve recycling efficiency and reduce environmental impact, addressing the growing waste management challenges in urban settings.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW); Fast Pyrolysis; Solid Heat Carrier; Waste-to-Energy; Techno-Economic Analysis.

Технология быстрого пиролиза с твердым теплоносителем для переработки твердых бытовых отходов

Еламан Айбульдинов, Нуркен Нургалиев, Руслан Сафаров, Жанар Искакова, Айнагул Колпек, Тогжан Машан, Лязат Кусепова

Аннотация: Переработка твердых бытовых отходов (ТБО) имеет важное значение для решения экологических проблем, вызванных растущей урбанизацией и образованием отходов. В данной работе исследовано применение технологии быстрого пиролиза с твердыми теплоносителями для эффективной переработки ТКО. Технология, изначально разработанная для переработки сланца, предполагает термическое разложение отходов в бескислородной среде с использованием собственной золы в качестве теплоносителя. Этот метод дает ценную продукцию, в том числе синтетическую нефть, газ, тепловую и электрическую энергию, строительные материалы и ферросплавы. В ходе исследования проведен комплексный технико-экономический анализ установок быстрого пиролиза производительностью 150 000 тонн/год (УТТ-500) и 1 000 000 тонн/год (УТТ-3000), оценена их техническая целесообразность, экономическая целесообразность и экологические показатели. Результаты показывают, что эта технология может значительно снизить вредные выбросы по сравнению с традиционным сжиганием и обеспечивает большую универсальность при переработке различных типов отходов. Результаты подтверждают потенциал быстрого пиролиза для улучшения управления ТБО, соответствующего принципам экономики замкнутого цикла и способствуя устойчивым практикам управления отходами. Это исследование подчеркивает необходимость инновационных решений для повышения эффективности переработки и снижения воздействия на окружающую среду, решая растущие проблемы управления отходами в городских условиях.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы (ТБО); быстрый пиролиз; твердый теплоноситель; преобразование отходов в энергию; технико-экономический анализ.

Modeling of catalytic reforming process with fixed bed catalyst based on industrial data

Rizagul Dyussova^{1*}, Moldir Borashova², Yakobs Sergeyevs¹, Ilias Kuanyshev³

¹Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan;
rizagul.dyussova@gmail.com, sergeevs_yakobs@mail.ru

²S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan;
moldirborasheva1992@gmail.com

³ The Association of Producers and Consumers of Petrochemical Products (Petrochemical Association), Astana, Kazakhstan;
arioninvest@3gmail.com

*Correspondence: rizagul.dyussova@gmail.com

Abstract: This study presents the development of a kinetic model of the catalytic reforming process using data from a commercial fixed-bed catalyst plant. Model parameters were determined by minimizing discrepancies between calculated values and industrial data, ensuring high accuracy in predicting reformate composition. The proposed model combines the simplicity of generalized approaches with the benefits of more detailed models, enabling efficient prediction of reformate composition and accounting for key process variables (temperature, pressure, hydrogen/hydrocarbon ratio, and feed rate). Validation was conducted with both laboratory isothermal data and industrial data, confirming its practical applicability. The software developed from this model demonstrated high accuracy, with calculation errors under 3% and less than 1% error in determining aromatic hydrocarbon concentration. These results confirm the model's precision, making it suitable for real-time process control and optimization. The model's application in industry will not only increase the yield of target products and improve fuel quality but also reduce production costs by optimizing operating modes and extending catalyst life. Given tightening environmental regulations, the model is an important tool for ensuring sustainable development in oil refineries. Future research could enhance its integration with digital control systems and optimize energy efficiency in Kazakhstan's oil and gas enterprises.

Citation: Dyussova, R., Borashova, M., Sergeyevs, Y., Kuanyshev, I. (2025). Modeling of catalytic reforming process with fixed bed catalyst based on industrial data. *Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 150(1), 36-51.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-36-51>

Academic editor:
E.Ye. Kopishev

Received: 03.02.2025
Revised: 26.02.2025
Accepted: 10.03.2025
Published: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Keywords: mathematical modeling, oil refining, optimization, resource efficiency, petrochemistry, catalytic reforming.

1. Introduction

Catalytic reforming is a key process in the petrochemical industry, used to improve gasoline quality and produce high quality chemical products. This process plays an important role in increasing the octane rating of fuels, as well as in the production of aromatic hydrocarbons and hydrogen, making it indispensable in petroleum refining.

In the context of the global transition to sustainable development and tightening environmental regulations, the oil refining industry faces the need to introduce advanced technologies aimed at improving energy efficiency and reducing harmful emissions. One of the most important processes in the production of high-octane gasoline is catalytic reforming, which provides improvement of octane number and obtaining valuable aromatic hydrocarbons. However, this process is energy intensive and generates by-products such as carbon dioxide and other harmful emissions.

Development and use of mathematical models of reforming processes allow not only to optimize technological parameters, but also to significantly reduce energy consumption and emissions. The use of models contributes to:

- reducing the time required to conduct pilot tests;
- determination of optimal operating modes to maximize the yield of target products;
- reduction of coke formation and prolongation of catalyst service life;
- increase the safety of plant operation.

In the context of the transition to more environmentally friendly technologies, such models become an important tool for reducing the carbon footprint of production. Optimization of technological processes based on modeling helps to reduce the use of raw materials and energy, which is in line with the goals of sustainable development and global environmental requirements.

In Kazakhstan, the main oil refining is carried out by three large oil refineries (refineries). The total design capacity of these three refineries is 16.6 million tons of crude oil per year. However, actual refining volumes may differ from the design capacity due to various factors such as scheduled maintenance, modernization and market conditions.

In terms of global figures, as of January 2022, the total capacity of catalytic reforming processes was 14.6 million barrels per day, equivalent to about 730 million tons per year.

Thus, Kazakhstan's share in global reformate production is relatively small. Nevertheless, it is important for the country to optimize existing processes and introduce modern technologies to improve the efficiency and environmental safety of oil refining.

Given the strategic role of the oil refining industry for the economy of Kazakhstan, the development and implementation of mathematical models of catalytic reforming processes seem to be relevant and in demand. This will allow not only to improve the quality of produced fuel, but also to reduce the negative impact on the environment, meeting international environmental standards.

Mathematical modeling of catalytic reforming began to develop in the 1950s, when the first attempts were made to describe reactions in the catalyst using empirical data (Krane et al., 1959). In the 1970s and 1980s, models became more sophisticated, considering reactions such as isomerization, dehydrogenation, and other mechanisms, as well as hydrocarbon interactions. At this time, differential equations and numerical methods began to be used extensively to improve accuracy (Ramage et al., 1987, 1980; Zhorov et al., 1980).

In the 1990s, dynamic models became available that described real-time changes in concentrations and temperatures, including parameters such as temperature, pressure, and catalyst degradation, which improved the prediction of reactor performance (Rodríguez and Ancheyta, 2011; Stijepovic et al., 2009).

Since the early 2000s, molecular and machine learning approaches have been incorporated into modeling to optimize catalyst performance and predict product composition. These methods allowed a wide range of factors to be considered, thereby improving the accuracy of predictions and the economic efficiency of the process (Sotelo-Boyás and Froment, 2008; Wei et al., 2008a, 2008b).

Recent interest in the reforming process has been driven by two main factors: reformate has become a major source of aromatic hydrocarbons in gasoline, and new legislative restrictions address benzene and aromatic hydrocarbon content in commercial gasoline (Sapre and Katzer, 2020; Velázquez et al., 2023).

The main chemical reactions of catalytic reforming include (As Martínez et al., 2022; Rekoske et al., 2017):

1. Isomerization of normal alkanes into isoalkanes, which is a fast exothermic reaction and leads to a slight increase in octane number. The reaction itself does not depend on the number of carbon atoms in the molecule, and its thermodynamic equilibrium depends mainly on the temperature of the process. High temperature favors the acceleration of the reaction. Isomerization reactions take place on acidic catalyst centers.



2. Dehydrocyclization of alkanes (aromatization), which involves dehydrogenation to form aromatic hydrocarbons and hydrogen. The reaction proceeds on metallic and acidic catalyst centers. Alkanes with higher molecular weight undergo this reaction most rapidly, but they are also the most susceptible to the side reaction of hydrocracking. The reaction is accelerated by high temperature and low pressure, but, in general, this rate is much lower than the rate of the cycloalkane dehydrogenation reaction.



3. Dehydrogenation of naphthenes to aromatic hydrocarbons, which is an endothermic reaction requiring high temperatures and low pressures for efficient proceeding. The rate of these reactions is high compared to other reactions. Since dehydrogenation of naphthenes provides high-octane components, intensification of this reaction is the most desirable process.



4. Isomerization of five-membered cycloalkanes into cyclohexane derivatives, an exothermic reaction with a relatively low rate.



5. Hydrocracking of alkanes has 2 stages and proceeds both on metal and acid catalyst centers. At the first stage, the dehydrogenation reaction takes place on metal centers, after which the resulting alkene molecule is broken on the acid center and the resulting short chain alkene is hydrogenated. The reaction rate increases with increasing temperature and pressure. It is an undesirable reaction, because due to hydrocracking the content of alkanes in reformat decreases, which leads to an increase in the concentration of aromatic hydrocarbons and a decrease in reformat yield.



Various kinetic models have been described in the literature to represent the catalytic reforming process. All these models take into account some or all of the reactions mentioned above, catalytic reforming, and simplify the complex mixture of naphthenes so that each of the three classes of hydrocarbons - paraffins, naphthenes and aromatic hydrocarbons – is represented by a single compound with the average properties of that class.

Mathematical modeling of the catalytic reforming process continues to develop. One of the popular models is the Jorge model (Arani et al., 2009), which includes 24 differential equations and 71 kinetic parameters, describing the behavior of paraffins, naphthenes, and aromatic hydrocarbons, as well as the effect of temperature and pressure on the kinetic constants. This model was validated

using experimental data obtained from fixed bed catalyst plants. As a result, the deviation of calculated data from experimental data did not exceed 3%.

Other studies (Wei et al., 2017) focus on dynamic modeling of catalytic reforming of naphtha, examining changes in hydrocarbon concentrations as well as temperature and hydrogen profiles in the reactor to optimize conditions to produce high quality reformate. In recent years, much attention has been given to molecular models and grouping methods, which help simplify the calculation by combining feedstock components.

The authors (Elizalde and Ancheyta, 2015) focus on the construction of a molecular model of the catalytic reforming process of naphtha and its optimization considering molecular information. Reactions in the reactor are modeled using a reaction network including six classes of reactions. The process is then simulated using dynamic equations and kinetic constants to predict the molecular composition of the products.

Due to the large number of components in the feedstock, unaccounted reactions and high process temperature, the design and modeling of catalytic reforming reactors are accompanied by difficulties. To simplify modeling, the grouping method (lumping) is widely used, which allows combining feedstock components, which significantly reduces the complexity of calculations. We have considered several existing kinetic models of reforming, such as those proposed by (Arani et al., 2009). In this paper, the authors propose a model in which naphtha is represented by 17 hydrocarbon fractions with 15 reaction pathways and a simple catalyst deactivation model proposed by (Elizalde and Ancheyta, 2015; Jarullah et al., 2023). The model contains 17 "pseudo-components" connected by 15 reaction pathways. The kinetic and thermodynamic parameters of the model were obtained by optimization based on plant data. The authors also propose equations for calculating thermodynamic equilibrium constants between lumped hydrocarbons as a function of temperature.

Based on the above, there are several different kinetic models to describe the catalytic reforming process, each with its own advantages and limitations. The models simplify the complex mixture of hydrocarbons by dividing them into three main groups: paraffins, naphthenes and aromatic hydrocarbons. Some models, such as the Krane model (Krane et al., 1959), have shortcomings such as not accounting for isomerization or the effects of temperature and pressure on kinetic constants. In response to these limitations, newer models (Jarullah et al., 2023; Mokheimer et al., 2024), take into account more factors including temperature, pressure, and hydrocarbon domain expansion, resulting in a better fit to experimental data.

It is important to note that while simplified multi-group models may not perfectly capture all features of the process, the use of such models is often justified because they can effectively predict outcomes at a lower computational cost than more complex approaches.

2. Materials and methods

The main tool for numerical studies in this work is a mathematical model of the process of catalytic reforming of gasolines. The model is developed on the basis of a formalized scheme of hydrocarbon transformations, taking into account the main chemical reactions and the influence of technological parameters on the yield and quality of target products

The input data for model building was collected from the following sources:

- industrial data provided by operating catalytic reforming units at Kazakhstan refineries;
- laboratory analyses of component and group composition of feedstock and reformate;
- literature sources containing kinetic data and characterization of typical catalysts.

Gas chromatography to determine the individual composition of hydrocarbons; infrared spectrometry to assess the presence of functional groups; gravimetric method to measure the content of sulfur and other impurities (GOST 6370-83; GOST 31271-2012; GOST 13379-82) were used to analyze the composition of raw materials.

The data collected covered the characteristics of fractions such as: naphthenic hydrocarbons (cycloalkanes); paraffins (normal and isomeric); aromatic hydrocarbons (benzene, toluene, xylenes).

The model was developed using a sequential and multicomponent approach. At the first stage, a system of differential equations describing the dynamics of changes in component concentrations was determined. To describe the reaction rate, the Arrhenius equations were used, taking into account the influence of temperature and pressure. The equations of material and thermal balances were applied, taking into account the input of raw materials, reaction products and heat losses.

3. Results

3.1 Modeling and validation of the reforming process

The first stage of the study was to determine the key kinetic equations and parameters affecting the reforming process, as well as to build a mathematical model based on a software product. This stage included collection and analysis of data on chemical reactions occurring in the reforming process.

The mathematical model developed in the course of the study allows predicting the behavior of the plant under different conditions, which is the basis for process optimization.

The group and component composition of the oil was then determined. These oil samples were selected in accordance with the information provided by production, which allowed the oil that actually goes to the refinery to be examined.

The method of fractional composition determination was realized using a gas chromatograph ChromateK-5000 (Russia). The process of fractional composition determination was carried out according to the methods specified in (Russel et al., 2023; Sundari and Vaidya, 2012).

After analysis using a gas chromatograph, the chromatogram results were analyzed. Component analysis was performed on each of the oil samples to determine the group composition of the feedstock. This analysis is of key importance for further prediction of oil refining, as it allows not only to understand what hydrocarbons are present in the oil, but also how they can be used in various refining processes.

Oil components were categorized into 69 components, depending on the number of carbon atoms in the molecule. In addition, the contribution of each component to the process of octane number increase was taken into account during the analysis.

Next, process conditions identical to those of the actual operating plant were entered into the Reforming software we developed. This included parameters such as temperature, pressure, feedstock composition and other important factors that directly influence the efficiency of the reforming process. An example of input data such as catalyst temperature or feedstock composition was shown in Figure 1. This data allowed the accuracy of the mathematical model to be verified, as well as the prediction of plant performance under different conditions and with different feedstock types.

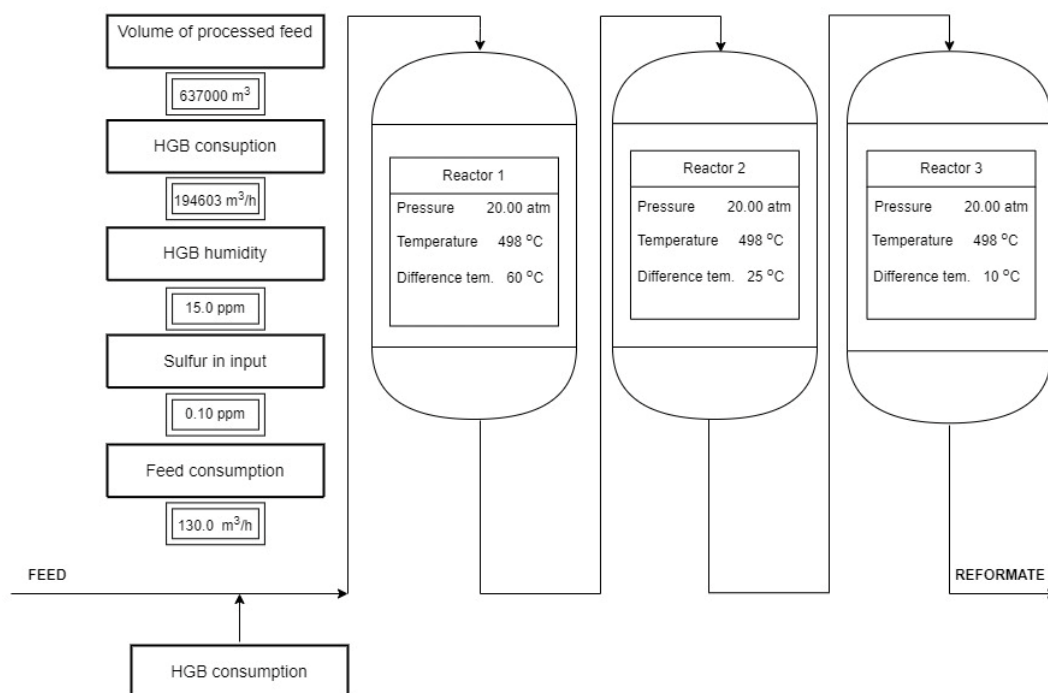


Figure 1. "Reforming" software product with process parameters

3.2 Kinetic and reactor equations

Formalization of the mechanism of hydrocarbons transformation in the reforming process together with aggregation of material flow compositions by homologous series and reactivity of components allows to simplify the model considerably, reduce the number of considered components to 69, while preserving its physicochemical essence.

Aggregation is performed at two levels: by contribution to the octane number increase and by the number of carbon atoms in the molecule, which is an undeniable advantage over numerous other techniques.

The scheme of transformations developed on the basis of the obtained experimental studies is presented in Figure 2.

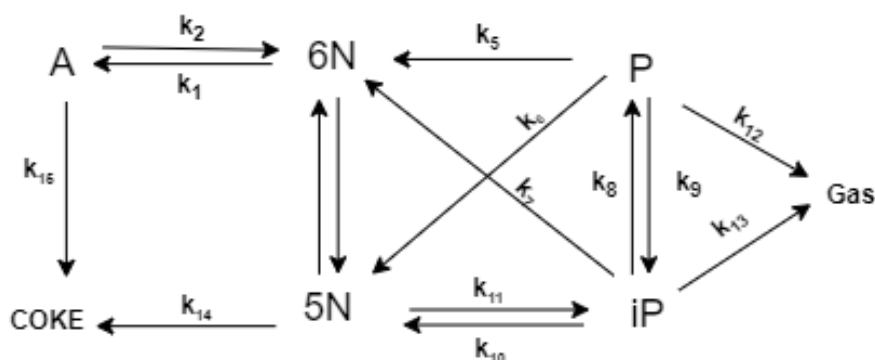


Figure 2. Scheme of hydrocarbon transformations in the catalytic reforming process with chemical reaction rate constants k_n

The catalyst is in a fixed bed through which the oil-gas mixture flows. The reaction kinetics in this case will be more stable and predictable because the reaction conditions in the catalyst bed will be more homogeneous.

The reaction rate will depend on the thickness of the catalyst layer, the intensity of heat exchange and the diffusion of reactants through the layer.

It is important to consider that due to the lack of catalyst movement in the reactor, localized overheating or accumulation of reaction products in the vicinity of the catalyst may occur, which can lead to reduced efficiency.

The catalyst efficiency may be lower than in the moving bed case due to possible diffusion and thermal issues.

The reaction order of each hydrocarbon reactant is one.

According to hypotheses (Chen, 2023; Pasandide and Rahmani, 2021; Yang et al., 2022) and reaction network, reaction rates are expressed by Equations (6–10).

Dehydrocyclization of n-paraffins (i=1–7)

$$r(i) = k_i \left(P(nP_s) - \frac{P(N_s)P(H_2)}{K_{eq,i}} \right), s = 6 - 12. \quad (6)$$

Dehydroaromatization of naphthenes (i=8-15)

$$r(i) = k_i \left[P(N_s) - \frac{P(A_s)P(H_2)^3}{K_{eq,i}} \right], s = 6 - 12. \quad (7)$$

Isomerization of paraffins (i=16-24)

$$r(i) = k_i \left(P(nP_s) - \frac{P(iP_s)}{K_{eq,i}} \right), s = 4 - 12. \quad (8)$$

Transalkylation of aromatic compounds (i=25-32)

$$r(i) = k_i \left(P(A_s)^2 - \frac{P(A_{s-1})P(A_{s+1})}{K_{eq,i}} \right), s = 7 - 11. \quad (9)$$

Hydrocracking of n-paraffins (i=33–40)

$$r(i) = k_i P(nP_s) P(H_2), s = 5 - 12. \quad (10)$$

Hydrocracking of isoparaffins (i=41–48)

$$r(i) = k_i P(iP_s) P(H_2), s = 5 - 12. \quad (11)$$

Hydrodealkylation of aromatic compounds (i=49–67)

$$r(i) = k_i P(A_s) P(H_2), s = 7 - 12. \quad (12)$$

Reaction of addition of n-paraffins to nP₁₁ (i = 68)

$$r(i) = k_i P(nP_8) P(nP_3). \quad (13)$$

Reaction of addition of n-paraffins to nP_{12} ($i = 69 - 70$)

$$r(i) = k_i P(nP_s) P(nP_{12-s}), s = 7 - 8. \quad (14)$$

Reaction of addition of aromatic compounds to A_{12} ($i = 71 - 73$)

$$r(i) = k_i P(A_s) P(nP_{12-s}), s = 7 - 8. \quad (15)$$

In order to model the reforming kinetics taking into account the reversibility of the reactions, the equilibrium constants of the reactions of the aggregated components were first calculated by a procedure using the Want-Goff equation (Samad et al., 2023):

$$\ln K_{pj} = \Delta S_j / R - \Delta H_j / RT. \quad (16)$$

Using standard algorithms of modeling of ideal displacement reactors and equations of material and heat balances, the following model of reforming reactor can be written down (17, 18):

$$\alpha \frac{dY_i}{d\xi} = \rho_k \frac{\tau}{c_0} (w_i - Y_i r_v), \quad \frac{d\alpha}{d\xi} = \rho_k \frac{\tau}{c_0} r_v \quad (17)$$

$$\frac{dT}{d\xi} = \frac{\rho_k \tau}{c_p c_0} \sum_j r_j \Delta H_j \quad (18)$$

The main technological parameters of the reforming process, in addition to temperature and pressure, are the volumetric feed rate of liquid feedstock and WSS circulation ratio.

Therefore, it is reasonable to write down the mathematical model of the reactor in the same terms.

$$V_L = \frac{v_L}{V_x^*} N_v = \frac{v_x}{v_L} \quad (19)$$

The equation for the temperature will, in this case, have the form:

$$\frac{dT}{d\xi} = \frac{\tau_B}{c_p} \sum r_j \Delta H_j. \quad (20)$$

It was found that the activation energies of reactions during the reforming process and for different feedstocks do not change, so their values are assumed constant. The variation of the reaction rate constant with temperature is described by the Arrhenius equation, so calculations are made using the following formula (Chen, 2023; Chen et al., 2023):

$$k_{T2} = k_{T1} \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]. \quad (21)$$

4. Discussion

Table 1 presents the results of component analysis for 10 oil samples representing different types of hydrocarbon resources. For each sample, a comprehensive examination of the component composition, including determination of hydrocarbon content, was performed. These results facilitate comparative analysis and help identify compositional characteristics unique to each sample.

Table 1. Compositions of raw materials for catalytic reforming

Fraction	Number of sample									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n-paraffins, (%)	21.78	22.10	23.81	31.55	29.82	21.58	24.20	24.24	26.76	25.85
iso-paraffins, (%)	24.25	19.14	18.71	25.83	23.64	24.33	26.63	23.29	22.41	23.40
naphthenes, (%)	31.61	33.89	30.90	30.24	26.95	31.00	32.44	44.50	40.35	40.58
Aromatic hydrocarbons, (%)	22.34	24.90	26.60	12.39	19.58	23.07	16.73	7.11	9.62	8.88

Table 1 shows that the content of n-paraffins in the analyzed samples ranges from 21.58% to 31.55%. Higher concentration of n-paraffins increases the yield of high-octane products, as they are easily converted into aromatic hydrocarbons.

The share of isoparaffins varies from 18.71% to 26.63%. Despite their lower reactivity, their presence contributes to the increase of octane number in the final product due to isomerization and cyclization processes. The content of naphthenes ranges from 26.95% to 44.5%, which is advantageous for the reforming process, since naphthenes are easily transformed into aromatic compounds, which further increases the octane number.

The aromatic hydrocarbon content ranges from 7.11% to 26.6%, indicating that the feedstock already has some high-octane properties. Nevertheless, careful monitoring of coke formation is essential to maintain process efficiency. Among the analyzed feedstocks, materials with high naphthene content are considered to be the most valuable for the reforming process, since naphthenes are converted into aromatic hydrocarbons with higher selectivity than paraffinic hydrocarbons.

4.1 Simulation

Based on the proposed mathematical model, a software tool for modeling and analysis of the reforming process was developed. The software functions as a database management system, providing efficient storage, management and quick access to source materials and process data.

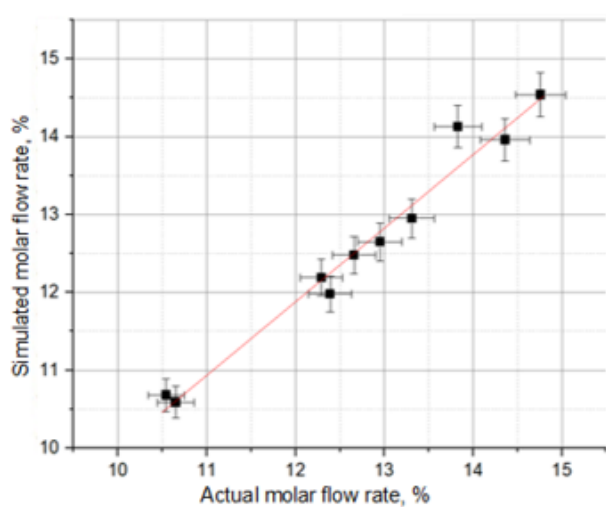
The main component of the software is a digital block diagram that visualizes and simulates the entire processing sequence. This flowchart provides a comprehensive representation of material and energy flows at each process step, allowing detailed monitoring of changes in raw materials and reaction products. The system displays all inputs and outputs, as well as critical parameters such as temperature, pressure, feedstock flow rate and other key process characteristics needed for thorough analysis and optimization.

The software is implemented using the Python programming language for flexibility, scalability and easy integration with other analytical tools.

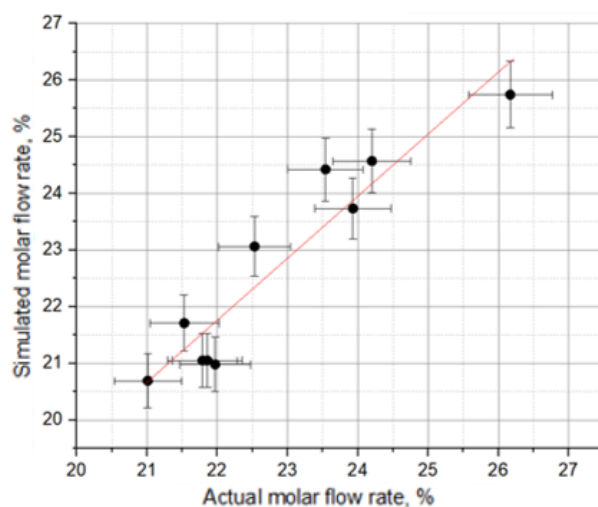
4.2 Model validation

Figure 3 shows a comparison of actual plant data and model predictions, providing an assessment of the adequacy of the developed kinetic model. Ten data sets from the plant were analyzed to validate the model, with operating conditions and feedstock consumption set in

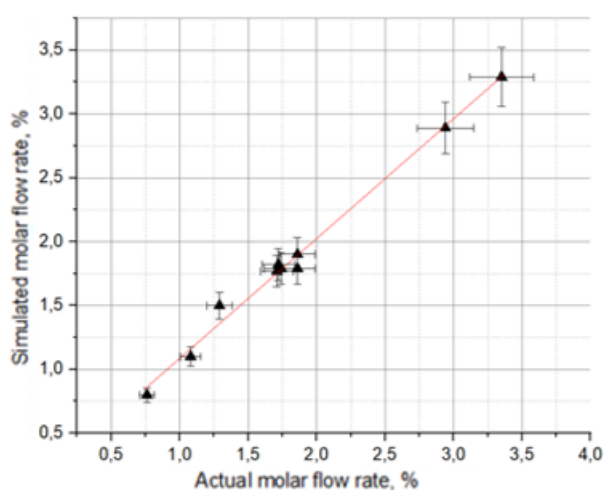
accordance with the plant's technical regulations. This comparison allows us to evaluate the accuracy of the model in predicting the efficiency of the reforming process under real operating conditions, ensuring its reliability for further analysis and optimization of the process.



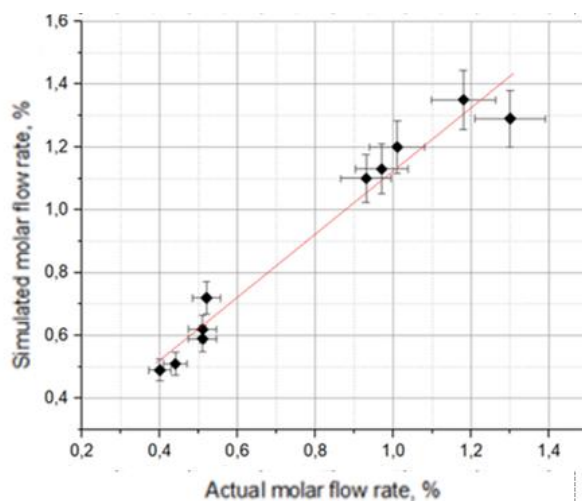
a) n-paraffins



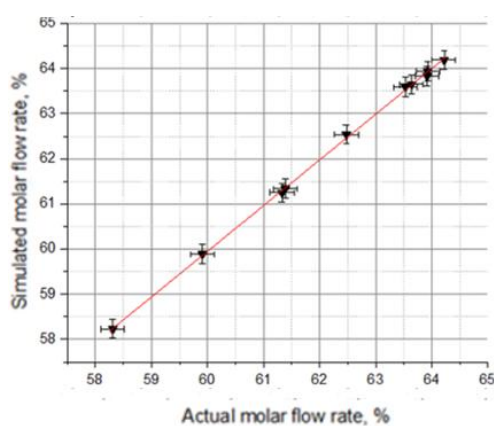
b) iso-paraffins



c) cycloalkanes – 5



d) cycloalkanes – 6



e) Aromatic hydrocarbons

Figure 3. Comparison of calculated and experimental values of catalytic parameters

To increase the reliability of the results of modeling and analysis of the catalytic reforming process, statistical processing of experimental and calculated data was carried out. The main statistical methods used were the estimation of standard deviation, coefficient of variation and correlation analysis between calculated and actual parameters.

Table 2. Results of statistical processing of data

Fraction	Average error	Mean absolute error	Coefficient of determination (R ²)
n-paraffins	-0.18	0.21	0.98
iso-paraffins	0.06	0.55	0.97
cycloalkanes-5	-0.03	0.06	0.99
cycloalkanes-6	-0.08	0.10	0.98
aromatic hydrocarbons	0.00	0.06	0.99

The coefficients of determination (R²) for all fractions exceed 0.97, indicating a high degree of consistency of the calculated data with the industrial results.

The aromatics fraction showed the highest prediction accuracy (R² = 0.99) with the lowest average error. Iso-paraffins showed a slightly higher average absolute error (0.55), indicating the possible influence of compositional uncertainty or process variations.

It should be noted that rate constants in generalized kinetic models usually depend on feedstock and catalyst characteristics, and their use for modeling reforming reactors under other feed conditions may not be appropriate if they are determined for specific conditions. However, if the kinetic model is sufficiently detailed, the rate constants can be considered independent of the initial feedstock composition, allowing them to be used to model reactors at other feed conditions. The main problem with the use of more complex models is that the simplicity of the kinetic representations inherent in models with a small number of generalizations is partially lost. The use of models with a large number of generalizations requires much more experimental data.

The developed model can be used for operational control of the reforming process at operating plants. It allows predicting changes in product composition when varying process parameters, which contributes to increased production flexibility and adaptation to changing market conditions. In addition, the model can serve as a tool for personnel training and practicing various scenarios of plant operation without risk to real production.

Implementation of the developed mathematical model into industrial practice will improve the efficiency and environmental safety of the catalytic reforming process. Accounting for catalyst deactivation and optimization of process parameters on the basis of the model will ensure stable product quality and extension of catalyst service life, which has a significant economic effect for oil refining enterprises.

5. Conclusion

In the framework of this study, a kinetic model of the catalytic reforming process was developed based on data from a commercial fixed bed catalyst plant. The model parameters were determined using the method of minimization of discrepancies between calculated values and industrial data, which provided a high degree of accuracy in predicting the reformate composition.

The proposed model combines the simplicity of generalized approaches with the advantages of more detailed models to effectively predict reformate composition and account for key process variables (temperature, pressure, hydrogen/hydrocarbon ratio and feed rate). Validation of the model was performed on both laboratory isothermal data and industrial data from commercial plants, confirming its versatility and practical applicability.

The developed program product based on this mathematical model demonstrated a high degree of adequacy. The total error of calculations was less than 3%. The error in determining the concentration of aromatic hydrocarbons was less than 1%.

These results indicate the accuracy and high detail of the model, which allows using it for operational control of the reforming process and development of recommendations for optimization of the plant operation mode.

The application of the developed model in industry will allow not only to increase the yield of target products and improve fuel quality, but also to reduce production costs by optimizing operating modes and extending catalyst lifetime. In today's conditions of tightening environmental requirements, such a model is an important tool to ensure sustainable development of oil refineries.

Future research aimed at integrating the model with digital control systems and optimizing energy efficiency can significantly improve the competitiveness of Kazakhstan's oil and gas enterprises and ensure compliance with international quality and environmental safety standards.

Thus, the developed kinetic model is not only a scientific achievement, but also a practical solution to improve the efficiency of reforming processes under the conditions of modern requirements to fuel quality and sustainable development of the industry.

6. Supplementary Materials: No Supplementary Materials.

7. Author Contributions

R.D. – research concept, text writing; M.B. – data analysis; Y.S. – data collection and processing, illustrations; I.K. – data collection and processing.

8. Author Information

Dyusova Rizagul Muslimovna – postdoctoral fellow, Toraigyrov University, 64, Lomova str., Pavlodar, Kazakhstan, 140000; rizagul.dyusova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>.

Borashova Moldir Duysengaliyevna – doctoral student, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, 1 Azattyk Avenue, Atyrau, Kazakhstan, 060000; moldirborasheva1992@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-2842-0078>.

Sergeyevs Yakobs – doctoral student, Toraigyrov University, 64 Lomova str., Pavlodar, Kazakhstan, 140000; sergeevs_yakobs@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>.

Kuanyshev Ilias Olzhasuly – financial Analyst, Association of Producers and Consumers of Oil and Gas Chemical Products (Oil and Gas Chemical Association), 8 Kunayev St., Astana, Kazakhstan, 010000; arioninvest3@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7617-5873>.

9. Funding: This research was funded under program-targeted funding by the Committee on Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. "BR24992883 Establishment of Scientific and Technological Park of Petrochemicals and Polymeric Materials for the provision of services, and implementation of applied results of R&D in priority sectors of the country's economy").

10. Acknowledgements: The authors would like to express their sincere gratitude to the Association of Petroleum and Gas Chemicals Producers and Consumers (Petroleum and Gas Chemicals Association) for the information and expert support, which became the basis for the creation of this article.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Arani, H. M., Shirvani, M., Safdarian, K., & Dorostkar, E. (2009). Lumping procedure for a kinetic model of catalytic naphtha reforming. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 723–732. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000400011>
2. Chen, J. (2023). Hydrogen production in fixed-bed reactors with combined reformer-burner modules by steam-ethanol reforming at different temperatures. *Authorea Preprints*, 6, 18. <https://doi.org/10.22541/AU.167569381.13621304/V1>
3. Chen, Z., Wang, Y., Li, Y., Wu, J., & Zhang, L. (2023). Explicit molecule-based reaction network simplification: Theory and application on catalytic reforming. *Chemical Engineering Science*, 277, 118833. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118833>
4. Elizalde, I., & Ancheyta, J. (2015). Dynamic modeling and simulation of a naphtha catalytic reforming reactor. *Applied Mathematical Modelling*, 39(3-4), 764–775. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.013>
5. GOST 6370-83 (ST SEV 2876-81). (n.d.). Neft', nefteprodukty i prisadki. Metod opredeleniya mekhanicheskikh primesey (utratil silu) [Oil, petroleum products and additives. Method for determining mechanical impurities (invalid)]. Retrieved February 2, 2025, from https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30008237
6. Gosudarstvennyy standart Soyuzo SSR. (n.d.). Neft'. Izdaniye ofitsial'noye. IPK Izdatel'stvo Standartov Moskva sertifikatsiya elektrooborudovaniya [State Standard of the Union of the SSR. Oil. Official Edition. IPK Publishing House of Standards Moscow certification of electrical equipment].
7. Jarullah, A. T., Ahmed, A. N., Altabbakh, B. A., & Ahmed, A.M. (2023). Design of new composites nano-catalysts for naphtha reforming process: Experiments and process modeling. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 30(2), 46–59. <https://doi.org/10.25130/TJES.30.2.6>
8. Krane, H., Groh, A., Schulman, B., & Sinfelt, J. (1959). Reactions in catalytic reforming of naphthas.
9. Martínez, J., Zúñiga-Hinojosa, M. A., & Ruiz-Martínez, R. S. (2022). A thermodynamic analysis of naphtha catalytic reforming reactions to produce high-octane gasoline. *Processes*, 10(313), 22. <https://doi.org/10.3390/PR10020313>
10. Matematicheskoye modelirovaniye dlya prognozirovaniya raboty katalizatorov riforminga na ustanovke so statsionarnym sloyem. (n.d.). Retrieved February 25, 2025, from <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/786371-matematicheskoe-modelirovanie-dlya-prognozirovaniya-raboty-katalizatorov-riforminga-na-ustanovke-so> [Mathematical modeling for predicting the performance of reforming catalysts in a fixed bed reactor].
11. Mokheimer, E. M. A., Shakeel, M. R., Harale, A., Paglieri, S., & Mansour, R. B. (2024). Fuel reforming processes for hydrogen production. *Fuel*, 359, 130427. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130427>
12. Pasandide, P., & Rahmani, M. (2021). Simulation and optimization of continuous catalytic reforming: Reducing energy cost and coke formation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 30005–30018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.151>
13. Ramage, M. P., Graziani, K. R., & Krambeck, F. J. (1980). Development of Mobil's kinetic reforming model. *Chemical Engineering Science*, 35(1), 41–48. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(80\)80068-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(80)80068-6)
14. Ramage, M. P., Graziani, K. R., Schipper, P. H., Krambeck, F. J., & Choi, B. C. (1987). Kinptr (Mobil's Kinetic Reforming Model): A review of Mobil's industrial process modeling philosophy. *Advances in Chemical Engineering*, 13, 193–266. [https://doi.org/10.1016/s0065-2377\(08\)60018-6](https://doi.org/10.1016/s0065-2377(08)60018-6)
15. Rekoske, J. E., Abrevaya, H., Bricker, J. C., Zhu, X., & Bricker, M. (2017). Advances in refining technologies. In *Advances in refining catalysis* (pp. 3–58). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9781315370125-2/ADVANCES-REFINING-TECHNOLOGIES-JAMES-REKOSKE-HAYIM-ABREVAJA-JEFFERY-BRICKER-XIN-ZHU-MAUREEN-BRICKER>

16. Rodríguez, M. A., & Ancheyta, J. (2011). Detailed description of kinetic and reactor modeling for naphtha catalytic reforming. *Fuel*, 90(11), 3492–3508. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.022>
17. Russel, A. S., Gupta, S., & Deo, G. (2023). The rate determining steps and rate equation for the oxidative dry reforming of methane over supported Ni catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110479>
18. Samad, A., Ahmad, I., Kano, M., & Caliskan, H. (2023). Prediction and optimization of exergetic efficiency of reactive units of a petroleum refinery under uncertainty through artificial neural network-based surrogate modeling. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 1403–1414. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.046>
19. Sapre, A. V., & Katzer, J. R. (2020). Some aspects of modeling in petroleum processing. In *Computer-Aided Design of Catalysts* (pp. 553–602). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003067115-13>
20. Sotelo-Boyás, R., & Froment, G. F. (2008). Fundamental kinetic modeling of catalytic reforming. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(3), 1107–1119. <https://doi.org/10.1021/ie800607e>
21. Stijepovic, M. Z., Vojvodic-Ostojic, A., Milenkovic, I., & Linke, P. (2009). Development of a kinetic model for catalytic reforming of naphtha and parameter estimation using industrial plant data. *Energy and Fuels*, 23(2), 979–983. https://doi.org/10.1021/ef800771x/suppl_file/ef800771x_si_001.pdf
22. Sundari, R., & Vaidya, P. D. (2012). Reaction kinetics of glycerol steam reforming using a Ru/Al₂O₃ catalyst. *Energy and Fuels*, 26(7), 4195–4204. <https://doi.org/10.1021/ef300658n>
23. Velázquez, H. D., Cerón-Camacho, R., Mosqueira-Mondragón, M. L., Hernández-Cortez, J. G., Montoya de la Fuente, J. A., Hernández-Pichardo, M. L., Beltrán-Oviedo, T. A., & Martínez-Palou, R. (2023). Recent progress on catalyst technologies for high quality gasoline production. *Catalysis Reviews*, 65(3), 1079–1299. <https://doi.org/10.1080/01614940.2021.2003084>
24. Wei, M., Yang, M., Qian, F., Du, W., He, W., & Zhong, W. (2017). Dynamic modeling and economic model predictive control with production mode switching for an industrial catalytic naphtha reforming process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(33), 8961–8971. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02610/asset/images/medium/ie-2017-02610s_0013.gif
25. Wei, W., Bennett, C. A., Tanaka, R., Hou, G., & Klein, M. T. (2008). Detailed kinetic models for catalytic reforming. *Fuel Processing Technology*, 89(4), 344–349. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.11.014>
26. Wei, W., Bennett, C. A., Tanaka, R., Hou, G., & Klein, M. T. (2008). Computer aided kinetic modeling with KMT and KME. *Fuel Processing Technology*, 89(4), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.11.015>
27. Yang, X., Wang, S., & He, Y. (2022). Review of catalytic reforming for hydrogen production in a membrane-assisted fluidized bed reactor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111832. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111832>
28. Zhorov, Y. M., Kartashev, Y. N., Panchenkov, G. M., & Tatarintseva, G. M. (1980). Mathematical model of platforming under stationary conditions with allowance for isomerization reactions. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 16(6), 297–300. <https://doi.org/10.1007/BF00730570>

Өнеркәсіптік деректер негізінде бекітілген қабаттағы каталитикалық риформинг процесін модельдеу

Ризагуль Дюсова, Мөлдір Борашова, Якобс Сергеевс, Илияс Қуанышев

Аңдатпа: Бұл зерттеуде каталитикалық риформинг процесінің кинетикалық үлгісі коммерциялық тұрақты катализатор зауытының деректерін пайдалана отырып әзірленді. Модельдік параметрлер есептелген мәндер мен өнеркәсіптік деректер арасындағы сәйкессіздіктерді азайту арқылы, қайта пішімдеу құрамын болжауда жоғары дәлдікті қамтамасыз ету арқылы анықталды. Ұсынылған модель жалпыланған тәсілдердің қарапайымдылығын егжей-тегжейлі үлгілердің артықшылықтарымен біріктіреді, бұл қайта пішімдеу құрамын тиімді болжауға және негізгі технологиялық айнымалыларды (температура, қысым, сутегі/көмірсутек қатынасы және беру жылдамдығы) есепке алуға мүмкіндік береді. Валидация зертханалық изотермиялық деректермен де, оның практикалық қолдану мүмкіндігін растайтын өнеркәсіптік деректермен де жүргізілді. Осы үлгі бойынша әзірленген бағдарламалық қамтамасыз ету жоғары дәлдікті көрсетті, ароматты көмірсутек концентрациясын анықтауда 3%-дан аз және 1%-дан аз қателікпен есептеу қателері бар. Бұл нәтижелер модельдің дәлдігін растап, оны нақты уақыттағы процесті басқару және оңтайландыру үшін қолайлы етеді. Модельді өнеркәсіпте қолдану мақсатты өнімдердің шығымдылығын арттырып, отын сапасын жақсартып қана қоймайды, сонымен қатар жұмыс режимдерін оңтайландыру және катализатордың қызмет ету мерзімін ұзарту арқылы өндіріс шығындарын азайтады. Экологиялық ережелерді қатайтуды ескере отырып, модель мұнай өңдеу зауыттарында тұрақты дамуды қамтамасыз етудің маңызды құралы болып табылады. Болашақ зерттеулер оның цифрлық басқару жүйелерімен интеграциясын жақсартуға және Қазақстанның мұнай-газ кәсіпорындарында энергия тиімділігін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: математикалық модельдеу, мұнай өңдеу, оңтайландыру, ресурс тиімділігі, мұнай химиясы, каталитикалық риформинг

Моделирование процесса каталитического риформинга с неподвижным слоем катализатора на основе промышленных данных

Ризагуль Дюсова, Молдир Борашова, Якобс Сергеевс, Илияс Қуанышев

Аннотация: В данном исследовании была разработана кинетическая модель процесса каталитического риформинга с использованием данных с коммерческой установки с неподвижным слоем катализатора. Параметры модели были определены путем минимизации расхождений между расчетными значениями и промышленными данными, что обеспечивает высокую точность прогнозирования состава риформата. Предложенная модель сочетает в себе простоту обобщенных подходов с преимуществами более подробных моделей, что позволяет эффективно прогнозировать состав риформата и учитывать ключевые переменные процесса (температуру, давление, соотношение водорода и углеводородов и скорость подачи). Валидация была проведена как с лабораторными изотермическими данными, так и с промышленными данными, что подтвердило ее практическую применимость. Разработанное на основе этой модели программное обеспечение продемонстрировало высокую точность с погрешностью расчетов менее 3% и погрешностью определения концентрации ароматических углеводородов менее 1%. Эти результаты подтверждают точность модели, что делает ее пригодной для управления процессом в реальном времени и его оптимизации.

Применение модели в промышленности позволит не только увеличить выход целевых продуктов и улучшить качество топлива, но и снизить себестоимость продукции за счет оптимизации режимов работы и продления срока службы катализатора. Учитывая ужесточение экологических норм, модель является важным инструментом для обеспечения устойчивого развития нефтеперерабатывающих заводов. Дальнейшие исследования могут улучшить интеграцию с цифровыми системами управления и оптимизировать энергоэффективность на нефтегазовых предприятиях Казахстана.

Ключевые слова: математическое моделирование, нефтепереработка, оптимизация, ресурсоэффективность, нефтехимия, каталитический риформинг

Исследование низкотемпературного пиролиза нефтяного сланца: физико-химические свойства и продукты термического разложения

Руслан Салихов¹, Михаил Петров^{1,*}

¹ООО «ТТУ», Санкт-Петербург, РФ; in-fo.galoter@gmail.com,
petrov2025sp@mail.ru

*Корреспонденция: petrov2025sp@mail.ru

Аннотация. Одной из приоритетных задач прикладной химии и химической технологии является переработка нефтешламов, что способствует снижению выбросов нефтегазовых предприятий и их дальнейшему использованию в качестве ценного вторичного сырья. В данной статье рассматривается исследование процессов пиролиза нефтяного сланца месторождения "Кендерлык", включая анализ его физико-химических свойств и продуктов термического разложения. Проведен детальный элементный анализ и изучен минеральный состав исходного сырья.

В ходе исследования проведены параллельные эксперименты по пиролизу нефтяного сланца, позволившие определить количественные выходы полукокса, пиролизного масла (смолы) и горючего газа. Проанализированы основные характеристики продуктов, такие, как их компонентный состав, теплотворная способность и другие параметры, имеющие важное значение для последующей переработки и использования.

Полученные экспериментальные данные продемонстрировали стабильные показатели выхода продуктов и подтверждают возможность эффективного использования пиролиза в переработке нефтяного сланца. Выделенные продукты обладают высоким энергетическим потенциалом и могут применяться в различных отраслях промышленности, включая топливно-энергетический сектор и металлургию. Таким образом, переработка нефтяного сланца методом пиролиза представляется перспективным направлением в сфере ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: пиролизная переработка, безотходное производство, утилизация отходов, нефтешлам, пиролизное масло, полукокс.

Цитирование: Салихов, Р., Петров, М. (2025). Исследование низкотемпературного пиролиза нефтяного сланца: физико-химические свойства и продукты термического разложения. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 52-65.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-52-65>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 12.02.2025
Исправлена: 28.02.2025
Принята: 10.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Введение

Топливо-энергетические ресурсы составляют основу экономики Казахстана, среди которых ключевыми являются нефть, уголь и газ. На сегодняшний день государственным балансом в Казахстане учтено 987 месторождений твердых полезных

ископаемых, 355 месторождений углеводородов, 3 666 месторождений общераспространенных полезных ископаемых и порядка 4 540 месторождений подземных вод (Ақбағова, 2024). Казахстан входит в десятку мировых лидеров по подтвержденным запасам угля, которые составляют около 2,4% от общемировых.

В структуре запасов преобладает бурый уголь (две трети), а оставшаяся треть приходится на каменный уголь (Ramazanova et al., 2019). В настоящее время потребление нефтяных ресурсов, не возобновляемых запасов ископаемого топлива постоянно растут, в то время как их запасы уменьшаются, что приводит к серьезным экологическим проблемам. Вместе с тем, темпы роста мировой экономики привели к увеличению спроса на углеводородные энергоресурсы, что повлияло на развитие альтернативных нефтяных источников энергии. Что касается запасов нефтяного сланца, Министерство промышленности и строительства Республики Казахстан сообщило об утверждении запасов сланцевой нефти на Карагансайском участке, расположенном в Карагандинской и Кызылординской областях. Геологические запасы нефти на этом участке составляют 56,4 млн тонн (Ishekenova, 2025).

Уголь и нефтяной сланец являются важными горючими ископаемыми, широко применяемыми в энергетике и промышленности. Уголь используется в производстве металлургического кокса, углеродных материалов, смол и гуминовых кислот, а также служит сырьем для химической промышленности, где из него получают бензол, толуол, ксилол и другие соединения (Safarov et al., 2019, Bhatt et al., 2021). Нефтяной сланец, содержащий кероген, при термической переработке (пиролизе) дает сланцевое масло и газ, которые могут быть преобразованы в жидкие и газообразные углеводороды, включая бензин, парафин и дизельное топливо (Reyes-Rivera et al., 2020, Dhyani et al., 2018).

Для эффективного использования углеродных ресурсов важно учитывать их органическую структуру. Уголь представляет собой сложный полимер с высокой степенью сшивки, содержащий ароматические и алифатические компоненты. Его свойства и промышленное применение зависят от степени метаморфизма (Taboada-Ruiz et al., 2024).

В отличие от угля, нефтяной сланец содержит органическую матрицу, в основе которой лежит кероген. Его взаимодействие с теплоносителями, такими, как водяной пар, способствует повышению эффективности выделения жидких и газообразных продуктов (Veses et al., 2020; Devi et al., 2014; Pyl et al., 2012).

Среди методов термической переработки углеродсодержащего сырья пиролиз считается одним из наиболее перспективных и широко изучаемых процессов. Для пиролиза используется мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Он применяется для переработки низкосортных углей, нефтешламов, нефтяного сланца и других углеводородных материалов (Chandran et al., 2020). Пиролиз является основой таких технологий, как сжигание, гидрогенизация, карбонизация и газификация, которые проводятся в замкнутых системах в инертной, восстановительной или окислительной атмосфере при различных температурах и давлениях (Sikhimbayeva et al., 2021).

Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для производства моторного топлива.

Контролируемый пиролиз угля и нефтяного сланца позволяет получать продукты с улучшенными характеристиками. Оптимальный температурный режим для пиролиза нефтяного сланца составляет 500–550°C, что обеспечивает максимальный выход жидких углеводородов (Sogum et al., 2021).

Среди наиболее ценных продуктов пиролиза угля и нефтяного сланца можно выделить каменноугольную смолу, сланцевое масло и газ. Эти вещества востребованы в химической промышленности для производства олефинов, ароматических соединений и других

высокоценных продуктов (Sieradzka et al., 2020; Toshmamatov et al., 2021; Marculescu et al., 2007).

На кафедре химии ЕНУ им. Л.Н. Гумилева в течение последних лет ведутся научные работы по разработке и внедрения принципиально новых, энергетически и экономически эффективных, экологически безопасных и производительных технологий утилизации низкокачественного топлива, бытовых и промышленных отходов. Основная цель - провести комплексный технико-экономический анализ переработки ТБО по технологии быстрого пиролиза с использованием твердых теплоносителей. В задачи данных исследований входит:

1. Оценить техническую возможность и экономическую целесообразность установок быстрого пиролиза с производительностью 150 000 тонн/год и 1 000 000 тонн/год для переработки сухих ТБО.

2. Оценить потенциал получения ценных продуктов, включая синтетическую нефть, газ, тепловую и электрическую энергию, строительные материалы и ферросплавы в процессе пиролиза.

3. Изучить возможность адаптации данной технологии, первоначально разработанной для переработки сланца, к различным видам низкопотенциального сырья, включая ТБО, бурый уголь и промышленные отходы. (Glazyrin et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024).

В основе предлагаемой технологии лежит метод быстрого пиролиза, разработанный специалистами Энергетического института имени Г.М. Кржижановского (Москва, Россия) в 1940-х годах. Этот метод заключается в термическом разложении тонкоизмельченного сырья в непрерывном бескислородном процессе с использованием в качестве теплоносителя собственной золы. При этом образуется парогазовая смесь и углеродисто-гнездовой остаток (полукокс). Этот универсальный метод подходит для переработки различных видов низкопотенциального сырья, включая горючие сланцы, бурый уголь, фильтровальные кеки и ТБО.

Технология была успешно внедрена на нескольких заводах по переработке сланца в Балтийском регионе. В качестве примера можно привести химический завод в Кивиыли (Эстония) с двумя установками УТТ-500, «Масляный завод» на территории Эстонской электростанции с двумя установками УТТ-3000 и VKG AS в Кохтла-Ярве (Эстония) с тремя установками УТТ-3000. Общая производительность этих установок УТТ превышает 5,3 млн тонн в год, а срок эксплуатации составляет от 6-12 лет (Кохтла-Ярве) до 40 лет («Нефтезавод»).

Многолетнее промышленное применение этой технологии при переработке сланца демонстрирует ее надежность и эффективность, что делает ее перспективным кандидатом для переработки ТБО. Исследования, проводимые в ЕНУ, направлены на адаптацию и оптимизацию этой проверенной технологии для решения задач, характерных для переработки ТБО, что может дать значительные преимущества в плане рекуперации энергии и воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными отходами. (Sabitov et al., 2024).

Контролируемый процесс пиролиза горючего сланца позволяет получать продукты более высокого качества. Важную роль играют температурные условия: оптимальный температурный диапазон для пиролиза составляет от 500 до 550°C, что обеспечивает высокий выход горючего сланца. Исследования также указывают на важность выбора теплоносителя для пиролиза горючего сланца. Например, использование водяного пара при конвективном нагревании горючего сланца повышает эффективность и качество получаемых продуктов. Это происходит из-за химического взаимодействия высокотемпературного водяного пара с керогеном, которое изменяет характеристики добычи нефти и газа (Nurgaliyev et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024).

В рамках научного проекта проводится исследование процессов пиролиза нефтяного сланца месторождения Кендерлык (Казахстан) с определением физико-химических свойств и продуктов термического разложения. Проведен анализ различных параметров пиролиза,

таких, как температура, время обработки и состав исходного сырья. Особое внимание уделено изучению влияния этих параметров на выход и состав продуктов, включая углеводороды, газообразные продукты и твердые остатки. Для достижения поставленных целей планируется использовать методы термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), что позволит получить точные данные о кинетике процессов разложения.

Ожидается, что результаты исследования помогут не только в понимании механизмов пиролиза нефтяного сланца, но и в разработке более эффективных технологий переработки, что имеет важное значение для энергетической безопасности и устойчивого развития региона. Кроме того, полученные данные могут быть использованы для оценки экономической целесообразности использования нефтяного сланца как альтернативного источника углеводородов.

2. Материалы и методы

Существующие методы анализа органосодержащего сырья, такие, например, как метод Фишера, позволяют определять общую картину процесса пиролиза исходного сырья, но не соответствуют промышленным процессам и технологиям в части скорости и оптимальной температуры пиролиза конкретного сырья. В результате выходы и состав получаемых при пиролизе продуктов не соответствует выходу и составу продуктов, получаемых по промышленным технологиям.

Стенд высокоскоростного пиролиза органического сырья имитирует промышленную технологию переработки органического сырья, базирующуюся на методе «Галотер» - технологии перегонки горючего органического сырья надземным способом, классифицируемой как технология горячей переработки твердых частиц. В процессе термического разложения используется горизонтальная цилиндрическая реторта типа вращающейся печи, которая слегка наклонена.

Сущность метода заключается в том, что исходное сырье в непрерывном процессе смешивается с теплоносителем – собственной горячей золой – теплоносителем, нагреваемой за счет потенциального тепла получаемого в результате пиролиза полукокса. Для пиролиза используется мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для производства моторного топлива.

Для анализа исходных образцов нефтяного сланца были подготовлены аналитические пробы. Для оценки химического состава угольной золы подготовлен образец массой 10 граммов.

Измельченный нефтяной сланец смешивали с измельченным твердым органическим компонентом, температура максимальной скорости разложения которого отличалась от температуры максимальной скорости разложения органического вещества нефтяного сланца не более чем на 5°C. Пиролизные процессы угля и нефтяного сланца проводили при 520°C в течение 80 минут согласно температурному режиму, приведенному в Таблице 1.

В ходе эксперимента суспензию древесного угля (50 г) нагревали в алюминиевой реторте, а продукты разложения направлялись в приемник, охлаждаемый ледяной водой, где происходила конденсация смолы и воды. Газообразные продукты после отбора проб для анализа выпускались в атмосферу. Определение компонентного состава газа, полученного в результате пиролиза угля, проводилось на хроматографе ЛХМ-8 МД.

Полученную из парогазовой смеси пиролизную смолу подвергали перегонке, в результате которой выделялись бензиновая и дизельная фракции, а также остаток с температурой кипения выше 350°C. Этот остаток смешивали с жидким продуктом нефтяного происхождения с температурой кипения выше 350°C, содержащим эмульгатор - асфальтены и 2–6,5% органических соединений серы на элементарную серу. В полученной смеси

эмульгировали водный раствор прекурсора катализатора, из которого при смешении с водородом и нагреве в условиях гидроконверсии формировался дисперсный сульфидный катализатор гидроконверсии.

После гидроконверсии жидкий продукт подвергали перегонке. Бензиновая фракция гидроконверсии объединялась с бензиновой фракцией, полученной при перегонке пиролизной смолы, а дизельная фракция гидроконверсии - с дизельной фракцией, выделенной при перегонке пиролизной смолы.

Элементный анализ твердых и жидких проб проводили на универсальном анализаторе Multi EA® 5100 (Analytik Jena, Германия). Этот прибор позволяет определять содержание серы, хлора, азота и углерода в жидких, твердых, пастообразных и газообразных образцах нефти, нефтепродуктов и других органических матриц. Масса пробы не превышала 10 мг. Твердые образцы измельчали в шаровой мельнице до размера частиц <100 мкм. Жидкие образцы гомогенизировали встряхиванием в течение 5 минут.

Калибровка прибора проводилась с использованием сертифицированных стандартных образцов (СО) для каждого определяемого элемента. Калибровочные кривые были построены в диапазоне концентраций 0,001% - 10% для серы, азота и хлора и 0,1% - 50% для углерода. Контроль качества обеспечивался ежедневным анализом контрольных образцов. Относительное стандартное отклонение результатов не превышало 2 % для всех определяемых элементов.

Все измерения проводились в трех экземплярах. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы OriginPro 2022 (OriginLab Corporation, США).

Таблица 1. Режим нагрева угольной суспензии и суспензии нефтяного сланца

Время нагрева, мин	Температура, °С
10	220
20	310
30	380
40	440
50	480
60	505
70	520
80	520

3. Результаты

3.1. Характеристика сырья

Результаты анализа исходного угля представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Характеристика сырья

Компоненты	Условное обозначение	Показатели по массе, %		
		Аналитическая	Сухой	Горючий
Влага	W	0,5		
Зола	A	52,24	52,50	
Сера	S	1,00	1,00	2,11
Углерод	C	22,79	22,90	48,21
Водород	H	2,29	2,30	4,84
Азот	N	0,50	0,50	1,05
Кислород	O	20,70	20,80	43,79
Теплотворная способность:	Q ₁	1929,7 ккал/кг		
Нижняя теплота сгорания	Q _h	2030,4 ккал/кг		

Анализ массовой доли хлора и мышьяка показал следующие значения: Cl – 0,058%, As – 0,0039%. Полученные показатели соответствуют "следам" и далее не учитываются.

3.2. Характеристика золы горючих сланцев

Химический состав минеральной части горючих сланцев представлен в Таблице 3.

Таблица 3. Химический состав минеральной части горючих сланцев (ОС - образец сланца)

№	Вещество	Содержание, %			
		ОС-1	ОС-2	ОС-3	ОС-4
1	SiO ₂	57,2	54,3	60,3	58,8
2	Al ₂ O ₃	11,2	10,8	9,4	9,7
3	Fe ₂ O ₃	7,4	5,9	6,8	6,4
4	CaO	4,6	4,9	6,8	5,7
5	MgO	3,2	3,4	1,5	2,8
6	S	2,8	2,5	1,6	1,9
7	K ₂ O	1,3	2,2	1,6	1,4
8	TiO ₂	2,6	3,5	2,9	2,4

Из всех представленных образцов ОС-4 представляет собой сбалансированный состав с умеренным содержанием всех компонентов без резких отклонений. Наибольшее содержание SiO₂ в образце 3 указывает на верхнюю долю кварцевых минералов, что делает этот образец более устойчивым к термическому воздействию. Кварц (основной компонент кремнезема) придает материалу термическую и механическую устойчивость, что делает этот образец более устойчивым к термическому разложению в процессе пиролиза или других методов термической обработки. В образцах 1 и 2 содержание серы и железа выше в сравнении с другими ОС, что может способствовать большему загрязнению выбросов, но также может иметь значение в химико-технологических процессах, где важны каталитические свойства железа.

3.3. Результаты балансовых экспериментов

В ходе исследования были проведены 4 балансовых эксперимента по пиролизу горючих сланцев, результаты которых представлены в Рисунке 1.

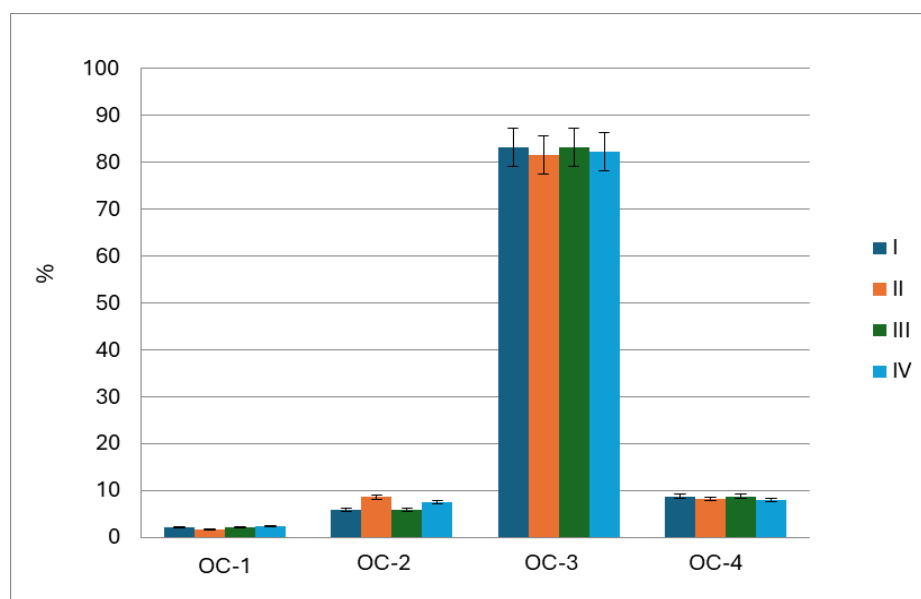


Рисунок 1. Выход продуктов пиролиза

Образцы отличаются высоким выходом масла и низкой влажностью, что делает их перспективным для переработки в жидкие углеводороды и использования в качестве энергетического сырья. Выход полукокса (83,2%) и потери газа (8,7%) связаны с высокой минерализацией и низким содержанием летучих углеводородов.

3.4. Характеристика продуктов пиролиза

Продукты пиролиза горючих сланцев — это газ, смола с подсточной водой и полукокс. Для исследования состава продуктов пиролиза было необходимо накопить около 50 г смолы с подсточной водой и собрать достаточное количество газа. Поэтому был проведен один эксперимент на увеличенной реторте с загрузкой 1 кг топлива для накопления смолы. Однако все расчеты и балансы приведены на основе усредненных результатов 4 экспериментов пиролиза.

Дополнительные параметры исследований включали: контроль температуры в реторте для определения оптимального режима, анализ состава газов, химический анализ смолы с определением ключевых компонентов, таких, как предельные углеводороды, азот, угарный и углекислый газы и серосодержащие соединения, а также оценку выхода и характеристики пиролизного газа, пиролизного масла и полукокса, включая его калорийность и структурные изменения после пиролиза.

3.4.1. Характеристика пиролизного газа

Пирогаз был отобран при двух разных температурах: 480°C и 520°C, соответствующих началу выделения газа и периоду максимального выделения газа для наиболее точного расчета его теплотворной способности. Таблица 4 показывает результаты анализа компонентного состава, полученного пиролизного газа, % (об.).

Таблица 4. Состав пиролизного газа

Компонент	Формула	Образец			
		ОС-1	ОС-2	ОС-3	ОС-4
Метан	CH ₄	1,11	0,34	0,12	2,01
Этан	C ₂ H ₆	1,33	0,41	0,14	2,41
Пропан	C ₃ H ₈	1,38	0,43	0,15	2,51
Бутан	C ₄ H ₁₀	0,55	0,17	0,06	1,00
Пентан	C ₅ H ₁₂	0,15	0,05	0,02	0,27
Этен	C ₂ H ₄	1,52	0,47	0,16	2,75
Пропилен	C ₃ H ₆	1,65	0,51	0,18	2,99
Бутилен	C ₄ H ₈	1,11	0,35	0,12	2,01
Водород	H ₂	1,00	3,26	7,42	0,12
Окись углерода	CO	44,64	43,40	0,50	0,50
Азот	N ₂	1,10	1,30	2,40	1,20
Углекислый газ	CO ₂	41,48	46,44	86,93	80,32
Сероводород	H ₂ S	2,98	2,87	1,81	1,91
Нижняя теплота сгорания	кДж/кг	12 706,85	7 992,83	1 608,22	12 676,69
Плотность	кг/м ³	1,58	1,56	1,79	1,90
Воздух для сгорания	м ³	3,07	1,87	0,51	3,36

Теплотворная способность газа была рассчитана с использованием эмпирической формулы Д.И. Менделеева. Для определения удельной теплоты сгорания твердых и жидких топлив наиболее простой является формула Д.И. Менделеева с эмпирическими коэффициентами для горючих элементов, кДж/кг:

$$Q_{н}^p = 339 C^p + 103 H^p - 109 (O^p - S^p) - 25W^p, \quad (1)$$

где C, H, S, O и W - содержание элементов и влаги в процентах.

Среднее значение низшей теплотворной способности газа составило 7731,95 ккал/кг. Этот высококалорийный газ был получен в основном за счет высоких концентраций метана и этана. Рассчитанная плотность газа на основе усредненных данных составила 1,13 кг/м³.

Наивысшая теплотворная способность пиролизного газа значительно превышает показатели исходного сырья: для газа - 12 706,85 кДж/кг, тогда как у исходного сырья этот показатель составляет 8 493,86 кДж/кг. Даже при минимальных значениях теплотворная способность масла и газа остается существенно выше, чем у исходного сырья и полукокса.

Представленные данные подтверждают превосходство энергетического потенциала пиролизных продуктов, особенно масла и газа, по сравнению с исходным сырьем и образующимся полукоксом.

3.4.2. Характеристика пиролизного масла

Масло представляет собой темную вязкую жидкость, легче воды, с характерным запахом. Масло, собранное из четырех экспериментов, было отделено от воды. В таблице 5 приведены результаты элементного анализа пиролизного масла.

Таблица 5. Элементный анализ пиролизного масла.

№	Образец	Состав						
		С, %	Н, %	N, %	О, %	S, %	Теплота сгорания, кДж/кг	Теплота сгорания, ккал/кг
I	ОС-1	84,6	10,5	0,9	1,8	2,2	41921,9	10014,6
II	ОС-2	85,3	9,8	0,6	2,3	2,0	41203,9	9843,1
III	ОС-3	79,4	9,1	0,3	9,7	1,5	37463,9	8949,6
IV	ОС-4	82,5	9,6	0,5	5,7	1,7	39600,4	9460,0

Как видно из полученных данных, масло содержит большое количество углерода с низким содержанием серы, что повышает его калориметрическую ценность.

Таблица 6. Физико-химические параметры пиролизного масла

Образец		25°C - 200°C, %	200°C-360°C, %	>360°C, %	ρ, кг/м ³	Температура сгорания, °C
I	ОС-1	4,6	26,7	68,7	896	308
II	ОС-2	3,4	25,4	71,2	891	301
III	ОС-3	2,1	20,1	77,8	909	327
IV	ОС-4	2,9	22,5	74,6	903	315

Физико-химические параметры масла: плотность (кг/м³) - 0,83; температура вспышки в открытом тигле - 313°C; температура застывания - 6°C. Образец ОС-1 имеет наибольшее содержание легколетучих фракций (4,6%), что указывает на более высокую испаряемость и легкость. ОС-3 имеет наименьшее количество летучих компонентов (2,1%), что делает его менее пожароопасным и более стабильным при хранении, так как он снижает возможности образования взрывоопасных паров в замкнутых пространствах. Это особенно важно при длительном хранении.

3.4.3. Характеристика полукокса

Характеристики полукокса, полученного в результате пиролиза угля, представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Элементный анализ полукокса

№	Образец	Полукокс						
		С, %	Н, %	N, %	О, %	S, %	Теплота сгорания, кДж/кг	Теплота сгорания, ккал/кг
I	ОС-1	14,4	1,1	0,4	10,6	0,7	5192,1	1240,3
II	ОС-2	15,6	0,8	0,3	9,6	0,5	5302,3	1266,7
III	ОС-3	8,9	0,5	0,2	5,5	0,2	3069,4	733,2
IV	ОС-4	10,9	0,6	0,2	6,2	0,4	3817,8	912,0

Данные таблицы показывают наибольшее содержание углерода, особенно в образцах 1 и 2 (14,4% и 15,6%), что свидетельствует об их более высокой теплоте сгорания (1240,3 и

1266,7 ккал/кг соответственно). Это указывает на высокий энергетический потенциал данных образцов при использовании их в качестве твердого топлива. Содержание водорода во всех образцах находится на низком уровне (0,5–1,1%), что типично для углеродных остатков после термической обработки. Содержание кислорода значительно варьируется, с максимальными значениями в ОС-1 (10,6%) и ОС-2 (9,6%), а минимальными – в ОС-3 (5,5%). Высокий уровень кислорода может указывать на присутствие кислородсодержащих соединений, что влияет на химические свойства полукокса. Низкое содержание серы во всех образцах указывает на экологическую безопасность их применения с точки зрения выбросов сернистых соединений.

4. Обсуждение

Химический состав минеральной части горючих сланцев месторождения "Кендерлык" представляет собой сбалансированный состав с умеренным содержанием всех компонентов. Различные образцы горючего сланца имеют свои преимущества в зависимости от целей их дальнейшей переработки, будь то энергетическое использование, производство строительных материалов или химическая переработка. Высокое содержание диоксида кремния может свидетельствовать о значительном содержании глинистых и песчаных частиц. Содержание Al_2O_3 свидетельствует о глинистом составе и может повлиять на огнеупорные свойства сланцев, а также привести к различным условиям формирования сланцевых отложений. Наличие оксида железа (III) и серы указывает на возможное присутствие пирита или сидерита. Значения K_2O и TiO_2 может свидетельствовать о примесях слюд и тяжелых минералов.

Проведенное исследование процесса низкотемпературного пиролиза горючих сланцев месторождения "Кендерлык" показало, что основными продуктами пиролиза являются полукокс (81,95%), горючий газ (8,2%) и пиролизное масло (7,9%).

Углерод является основным компонентом, определяющим энергетическую ценность полукокса. Содержание водорода и кислорода в этих образцах также превалирует, что также способствует увеличению количества энергии на единицу массы. В остальных сериях содержание представлено ниже, что также отражается на их теплотворных способностях. Низкое содержание азота указывает на наличие примесей белковых соединений или измеренных азотсодержащих веществ.

В полученном пиролизном газе в наибольших количествах присутствуют CH_4 (44,96%), CO_2 (16,27%), CO (12,16%) и C_2H_6 (9,74%). Остальные компоненты составляют менее 4% газа.

Полученное пиролизное масло характеризуется низким выходом летучих веществ и высокой теплотворной способностью ($Q = 9567,18$ ккал/кг). Это свидетельствует о том, что процесс пиролиза эффективно концентрирует энергию в продуктах переработки, превращая их в высокоэффективные источники энергии и в дальнейшем могут быть использованы как эффективное бездымное топливо и восстановитель в металлургической промышленности. Таким образом, ценные химические продукты, полученные из горючего сланца, могут быть эффективно использованы в области энергетики и химической промышленности.

5. Заключение

В настоящее время среди существующих методов термпереработки органических веществ пиролиз является наиболее перспективным и исследуемым термическим направлением переработки таких отходов, как низкосортные угли, нефтешламы, битумы и др. (Shandarin, 2016). Процесс быстрого пиролиза эффективно преобразует отходы в ценные продукты, такие, как синтетическое масло, газ, тепло- и электроэнергия, строительные материалы и ферросплавы, что способствует ресурсосбережению и энергетическому производству. Успешная адаптация этой технологии, разработанной для переработки горючих сланцев, подтверждает ее надежность и эффективность. Технология полностью

безотходна - все продукты пиролиза либо представляют коммерческую ценность (жидкое топливо, электро- и теплоэнергия, зола), либо используются в технологическом процессе (пиролизный газ, избыточное тепло). Образующаяся зола инертна и может применяться для производства строительных материалов, асфальта, удобрений, а также при плавке - для получения ферросплавов и карбида кальция.

В исследовании для пиролиза использовалось мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для дальнейшего использования. Экспериментальные данные показали эффективный выход продуктов, что подтверждает возможность использования пиролиза в переработке нефтяного сланца.

Преимущества переработки нефтяного сланца включают экономическую эффективность за счет использования местных ресурсов, снижения экологических рисков и повышения энергетической безопасности. Продукты процесса горения сланцев обладают высоким энергетическим потенциалом и могут применяться в различных отраслях промышленности, включая топливно-энергетический сектор и металлургию.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклад авторов.

Концептуализация, Р.С. и М.П.; методология, Р.С.; формальный анализ, Р.С.; исследование, Р.С. и М.П.; написание - подготовка оригинального черновика, М.П.; написание - рецензирование и редактирование, М.П.; руководство, Р.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах:

Салихов Руслан Минуллаевич – научный сотрудник, ООО «ТТУ», ул. Будапештская, д. 97, корп. 2 литер А, помещ. 9-Н, комната 33, Санкт-Петербург, РФ, 192283; info.galoter@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3374-676X>

Петров Михаил Сергеевич - научный сотрудник, ООО «ТТУ», ул. Будапештская, д. 97, корп. 2 литер А, помещ. 9-Н, комната 33, Санкт-Петербург, РФ, 192283; petrov2025sp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9121-7561>

9. Финансирование: Данное исследование было поддержано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882171).

10. Благодарности: нет.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akbarova, E. (2024). Doklad Predsedatelya Komiteta geologii Ministerstva promyshlennosti I stroitel'stva RK. *Elektron. Resur.* <https://www.gov.kz/memleket/entities/geology/press/news/details/902112?directionId=3783&lang=ru>
2. Bhatt, M., Chakinala, A. G., Joshi, J. B., Sharma, A., Pant, K. K., Shah, K., & Sharma A. (2021). Valorization of solid waste using advanced thermo-chemical process: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105434>

3. Chandran, R., Kaliaperumal, R., Balakrishnan, S., Britten, A. J., MacInnis, J., & Mkandawire, M. (2020). Characteristics of bio-oil from continuous fast pyrolysis of *Prosopis juliflora*. *Energy*, 190, 116387. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116387>
4. Devi, P., & Saroha, A.K. (2014). Risk analysis of pyrolyzed biochar made from paper mill effluent treatment plant sludge for bioavailability and eco-toxicity of heavy metals. *Bioresource Technology*, 162, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.093>
5. Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
6. Glazyrin, S. A., Aibuldinov, Y. K., Kopishev, E. E., Zhumagulov, M. G., & Bimurzina, Z. A. (2024). Analysis of the Composition and Properties of Municipal Solid Waste from Various Cities in Kazakhstan. *Energies*, 17(24), 6426. <https://doi.org/10.3390/en17246426>
7. Ishekenova, B. (2025). Kazahstane nashli bol'shie zapasy slancevoi nefti: dv kakih regionah ee hotyat dobyvat. *Elektron. Resurs.* <https://ism.kz/kazahstan-imeet-ser-eznye-zapasy-slancevoj-nefti>
8. Marculescu, C., Antonini, G., Badea, A., & Apostol, T. (2007). Pilot installation for the thermochemical characterisation of solid wastes. *Waste Management*, 27(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.011>
9. Nurgaliyev, N. U., Aibuldinov, Ye. K., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Mashan, T. T., Kusepova, L. A., & Kopishev, E. Ye. (2024). Investigation of the kinetics of the coal pyrolysis process. *Vestnik KazUTB*, 2, 280-289. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-456>
10. Nurgaliyev, N. U., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Aibuldinov, Ye. K., Sabitov, A. S., Kopishev, E. Ye., Salihov, R. M., Petrov, M. S., Alzhanova, G. Zh., Abdiyusupov, G. G., & Omirzak, M. T. (2024). Sovmestnyi piroliz nizkosortnogo topliva I prirodnogo bituma. *Vestnik KazUTB*, 2, 215-225. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-391>
11. Nurgaliyev, N. U., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Aibuldinov, Ye. K., Sabitov, A. S., Kopishev, E. Ye., Salihov, R. M., Petrov, M. S., Alzhanova, G. Zh., Abdiyusupov, G. G., & Omirzak, M. T. (2024). Sovmestnyi piroliz nizkosortnogo topliva I prirodnogo bituma. *Vestnik KazUTB*, 2, 215-225. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-391>
12. Nurgaliyev, N., Kolpek, A., Iskakova, Zh., Glazyrin, S., Safarov, R., & Aibuldinov, Ye. (2024). Low-temperature pyrolysis of coal with determination of physicochemical properties of coal and its thermal decomposition products. *E3S Web of Conferences. ICSREE 2024*, 545, 03004
13. Pyl, S. P., Van Geem, K. M., Puimège, P., Sabbe, M. K., Reyniers, M. F., & Marin, G. B. (2012). A comprehensive study of methyl decanoate pyrolysis. *Energy. Elsevier Ltd.*, 43(1), 146–160. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.11.032>
14. Ramazanova, N. Y., Berdenov, Z. G., Ramazanov, S. K., Kazangapova, N. B., Romanova, S. M., Toksanbaeva, S. T., & Wendt, J. (2019). Landscape-geochemical analysis of steppe zone basin Zhaiyk. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Series of Geology and Technical Sciences)*, 436, 33–41. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.95>.
15. Reyes-Rivera, J., Solano, E., Terrazas, T., Soto-Hernández, M., Arias, S., Almanza-Arjona, Y. C., & Polindara-García, L. A. (2020). Classification of lignocellulosic matrix of spines in Cactaceae by Py-GC/MS combined with omic tools and multivariate analysis: A chemotaxonomic approach. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 148, 104796. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104796>
16. Sabitov, A., Lopez, G., Mashan, T. T., Kusepova, L. A., Aibuldinov, Ye. K., & Kopishev, E. E. (2024). Investigation of oil shale pyrolysis process: Physicochemical properties and decomposition products. *E3S Web Conf. 2024 9th International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE 2024)*, 545, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454503002>

17. Safarov, R. Z., Shomanova, Z. K., Mukanova, R. Z., Nossenko, Y. G., Alexandru, I., Sviderskiy, A. K., & Sarova, N. (2019). Design of neural network for forecast analysis of elements-contaminants distribution on studied territories (on example of Pavlodar City, Kazakhstan). *Series Chemistry and Technology* (National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhshtan), 438, 86–98. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.78>.
18. Shandarin, V. D. (2016). Bezalternativnyi metod utilizacii uglerodsoderzhashih othodov – Nauchnoe obozrenie. *Tekhnicheskie nauki* (nauchnyi zhurnal), 2, 71–74. <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1082>
19. Sikhimbayeva, D., Zulkharnay, A., Zhakupov, A., Yessilov, A., & Kutybay, M. (2021). Analysis of factors affecting to the development of sub-production industry of the Republic of Kazakhstan. *Montenegrin Journal of Economics*, 17(3), 41–57. <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2021.17-3.4>
20. Sieradzka, M., Gao, N., Quan, C., Mlonka-Mędrala, A., & Magdziarz, A. (2020). Biomass thermochemical conversion via pyrolysis with integrated CO₂ capture. *Energies*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/EN13051050>
21. Sorum, L., Gronli, M. G., & Hustad, J. E. (2001). Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. *Fuel*, 80(9), 1217–1227. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00218-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00218-0)
22. Taboada-Ruiz, L., Pardo, R., Ruiz, B., Díaz-Somoano, M., Calvo, L. F., Paniagua, S., & Fuente, E. (2024). Progress and challenges in valorisation of biomass waste from ornamental trees pruning through pyrolysis processes. Prospects in the bioenergy sector. *Environmental Research*, 249, 118388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118388>
23. Toshmamatov, B., Davlonov, K., Rakhmatov, O., & Toshboev, A. (2021). Recycling of municipal solid waste using solar energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1030(1), 012165. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012165>
24. Veses, A., Sanahuja-Parejo, O., Callén, M. S., Murillo, R., & García, T. (2020). A combined two-stage process of pyrolysis and catalytic cracking of municipal solid waste for the production of syngas and solid refuse-derived fuels. *Waste Management*, 101, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.009>

Сланецтің төмен температуралық пиролизін зерттеу: физика-химиялық қасиеттері және термиялық ыдырау өнімдері

Руслан Салихов, Михаил Петров

Аңдатпа. Қолданбалы химия мен химиялық технологияның басым міндеттерінің бірі мұнай-газ кәсіпорындарының шығарындыларын азайтуға және оларды одан әрі бағалы екіншілік шикізат ретінде пайдалануға көмектесетін мұнай шламын өңдеу болып табылады. Бұл мақалада Кендірлік кен орнындағы мұнай тақтатастарының пиролиз процестерін зерттеу, оның ішінде физикалық-химиялық қасиеттері мен термиялық ыдырау өнімдерін талдау қарастырылған. Толық элементтік талдау жүргізіліп, шикізаттың минералдық құрамы зерттелді.

Зерттеу барысында жартылай кокстың, пиролиздік майдың (шайырдың) және жанғыш газдың сандық шығымдылығын анықтауға мүмкіндік беретін тақтатастардың пиролизі бойынша параллель тәжірибелер жүргізілді. Өнімдердің компоненттік құрамы, калориялық құндылығы және кейіннен өңдеу және пайдалану үшін маңызды басқа параметрлері сияқты негізгі сипаттамалары талданды.

Алынған тәжірибелік мәліметтер тұрақты өнім шығымдылығын көрсетті және тақтатасты өңдеуде пиролизді тиімді пайдалану мүмкіндігін растады. Оқшауланған өнімдер жоғары энергетикалық әлеуетке ие және әртүрлі салаларда, соның ішінде отын-энергетика

секторында және металлургияда қолданылуы мүмкін. Осылайша, мұнай тақтатастарын пиролиз әдісімен өңдеу ресурстарды үнемдеу және қоршаған ортаны қорғау саласындағы перспективті бағыт болып көрінеді.

Түйін сөздер: пиролизді өңдеу, қалдықсыз өндіріс, қалдықтарды жою, мұнай шламы, пиролиздік мұнай, жартылай кокс.

Study of low-temperature pyrolysis of oil shale: physico-chemical properties and thermal decomposition products

Ruslan Salikhov, Mikhail Petrov

Abstract: One of the priority tasks of applied chemistry and chemical technology is the processing of oil sludge, which contributes to the reduction of emissions of oil and gas enterprises and their further use as valuable secondary raw materials. This paper deals with the study of pyrolysis processes of oil shale from the ‘Kenderlyk’ field, including the analysis of its physical and chemical properties and thermal decomposition products. The detailed elemental analysis was carried out and mineral composition of the feedstock was studied.

During the research, parallel experiments on pyrolysis of oil shale were carried out, which allowed to determine quantitative yields of semi-coke, pyrolysis oil (tar) and combustible gas. The main characteristics of the products, such as their component composition, calorific value and other parameters important for further processing and use were analysed.

The obtained experimental data demonstrated stable product yields and confirm the possibility of effective use of pyrolysis in oil shale processing. The isolated products have high energy potential and can be used in various industries, including fuel and energy sector and metallurgy. Thus, oil shale processing by pyrolysis method seems to be a promising direction in the sphere of resource saving and environmental protection.

Keywords: pyrolysis processing, waste-free production, waste utilisation, oil sludge, pyrolysis oil, semi-coke.

Анализ влияния вторичных полимеров на свойства полимер-модифицированного битума

Аязжан Сыздык^{1*}, Гайни Сейтенова¹, Екатерина Жакманова¹, Лязат Толымбекова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; ayazhanka.syzdyk@gmail.com, gainiseitenova@gmail.com, ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, tolymbekova_lb@enu.kz

*Корреспонденция: ayazhanka.syzdyk@gmail.com

Аннотация: В данной работе исследуется модификация битума вторичным полипропиленом с точки зрения химических взаимодействий, структурных изменений и улучшения эксплуатационных характеристик битумно-полимерной системы. Рассматриваются процессы растворения и диспергирования полимера в битумной матрице, а также влияние молекулярной структуры полипропилена на реологические, термические и механические свойства полученного композита.

Описаны ключевые стадии подготовки битумно-полимерных композиций, включая термостабилизацию, гомогенизацию, определение оптимального соотношения компонентов и методы их смешивания. Проведен анализ изменений физико-химических характеристик модифицированного битума: температуры размягчения и глубины проникновения иглы при 25°C.

Результаты исследования показали, что введение вторичного полипропилена способствует увеличению термостойкости, повышению вязкости и улучшению адгезионных свойств битума. Это позволяет расширить его применение в составе асфальтобетонных покрытий, улучшая их долговечность и устойчивость к климатическим факторам.

Дополнительно изучены различные концентрации полимерной добавки (от 2% до 6%) и их влияние на структурные изменения битумного вяжущего. Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальная концентрация полипропилена обеспечивает улучшенные эксплуатационные свойства, снижая пластическую деформацию и повышая механическую прочность.

Применение вторичного полипропилена позволяет не только повысить качество дорожных покрытий, но и решить проблему утилизации полимерных отходов, снижая нагрузку на окружающую среду. Это открывает перспективы для дальнейших исследований в области полимерной модификации битума и разработки более экологичных и долговечных асфальтобетонных материалов.

Дополнительно рассмотрены механизмы взаимодействия полипропилена с битумной матрицей, включая влияние молекулярной массы, степени кристалличности и термической стабильности полимера.

Цитирование: Сыздык, А., Сейтенова, Г., Жакманова, Е., Толымбекова, Л. (2025). Анализ влияния вторичных полимеров на свойства полимер-модифицированного битума. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 66-81.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-66-81>

Академический редактор:
Э.К. Копишев

Поступила: 04.02.2025
Исправлена: 28.02.2025
Принята: 10.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Проведен сравнительный анализ свойств битума, модифицированного различными видами вторичных полимеров, что позволило выявить наилучший вариант для применения в дорожном строительстве.

Ключевые слова: битум; вторичный полипропилен; полимерные добавки; полимерно-битумные вяжущие материалы; модификация.

1. Введение

Развитие дорожного строительства требует создания материалов с улучшенными физико-химическими характеристиками, обеспечивающими их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Одним из перспективных направлений является модификация битумов вторичными полимерами, в частности, полипропиленом. Данный процесс сопровождается сложными химическими и коллоидными взаимодействиями, включая диспергирование, растворение полимерных макромолекул в битумной матрице и формирование структурированной гетерогенной системы. Введение полипропилена способствует повышению термостабильности, когезионной прочности и эластичности битума за счет образования пространственно-сетчатых структур и изменения фазового состояния вяжущего.

В рамках исследования проведен анализ химических и термодинамических аспектов взаимодействия вторичного полипропилена с битумом. Разработана технология получения битумно-полимерных композиций с оптимальным распределением фаз. Изучено влияние полимерной модификации на реологические и физико-химические свойства полимерно-битумных вяжущих. Проведена оценка структурных изменений и стабильности асфальтобетонных композиций, содержащих модифицированный битум, при воздействии температурных и механических факторов (Dalhat and Al-Adham, 2023; Ishag Obi et al., 2022; Joohari and Giustozzi, 2020; Karmakar and Roy, 2020; Lee et al., 2023; Yang et al., 2024).

Данное исследование направлено на поиск новых подходов к химической модификации битума с использованием вторичных полимеров, что позволит не только повысить эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, но и сократить объем пластиковых отходов, вовлекая их в технологический цикл.

В результате данного исследования были получены данные о механизме взаимодействия вторичного полипропилена с битумной матрицей, выявлены закономерности изменения его физико-химических свойств, а также установлены оптимальные условия модификации, обеспечивающие повышение температуры размягчения, снижение пластической деформации и улучшение когезионно-адгезионных характеристик битумного вяжущего.

Интенсивное воздействие окружающей среды, включая перепады температур в летний и зимний период, а также деформации под нагрузкой, негативно сказывается на состоянии дорожных покрытий. Это приводит к их преждевременному износу и сокращению срока эксплуатации (Maharaj et al., 2018; Mazurek et al., 2022; Sarang et al., 2016).

Битум (также известный как асфальтовое вяжущее) представляет собой побочный продукт переработки нефти, образующийся в процессе перегонки сырой нефти. Благодаря своим ценным свойствам, таким, как долговечность, высокая адгезия и водонепроницаемость, он нашел широкое применение в дорожном строительстве. Он широко известен как технический материал, получаемый в результате фракционной перегонки сырой нефти. Его химический состав сложен и вариативен, однако обычно выделяют четыре основные фракции: ароматические углеводороды, асфальтены, смолы и насыщенные соединения (García-Morales et al., 2004; Hossain et al., 2019; Syrmanova et al., 2017; Tahmoorian et al., 2018).

Для модификации битума наиболее часто применяются полимеры, среди которых около 75% составляют эластомеры, 15% – пластомеры, а 10% – измельченная резина от автомобильных покрышек и других материалов (Khan et al., 2016).

Как первичные, так и переработанные полимеры активно используются для модификации битума. Исследования по применению переработанных пластиков в битумной промышленности значительно увеличились за последнее десятилетие, что связано с усилиями многих стран по решению проблемы отходов, таких, как утилизация, экологические и медицинские последствия пластиковых отходов (García-Morales et al., 2004). Утилизация пластиковых отходов становится одной из самых актуальных глобальных проблем из-за роста потребления пластика. Воздействие на окружающую среду включает уничтожение естественных сред обитания для диких животных, угрозу проглатывания, а также перенос микроорганизмов с помощью пластика в экосистему (Hossain et al., 2019). Проблемы со здоровьем затрагивают кровеносную, дыхательную и лимфатическую системы, что может привести к отложению токсичных веществ в почках, кишечнике и печени. Для минимизации экологических и медицинских последствий этих отходов и улучшения характеристик битума сегодня активно изучается использование переработанных пластиковых полимеров в дорожном строительстве (Tahmoogian et al., 2018).

Следует отметить, что исследования отходов пластика в битуме начались примерно 20 лет назад, хотя до недавнего времени они не привлекали особого внимания, поскольку правительства активно инвестируют в переработку и зеленые технологии (Wang et al., 2018).

Полимеры, применяемые для модификации битума, делятся на три категории в зависимости от их химической структуры и свойств: пластомеры, эластомеры и химически функционализованные термопласты (Brasileiro et al., 2019). Несмотря на то, что полимерные модификаторы увеличивают термическую устойчивость битума, каждый вид полимера влияет на его свойства по-своему (García-Travé et al., 2016). В данной работе мы рассматриваем поливинилхлорид (ПВХ), который составляет около 10,1% европейского производства пластика. Он обычно используется для изготовления профилей, кабельной изоляции, садовых шлангов и оконных рам. В некоторых исследованиях ПВХ тестировался как полимерная модификация битума, хотя они не смогли получить успешных результатов из-за высокой температуры плавления полимера (Behl et al., 2014).

Условия смешивания для модификации битума ПВХ включали температуру в пределах 140–190°C, время смешивания от 20 минут до 3 часов, размер частиц от 0,075 до 2 мм, концентрацию ПВХ от 1 до 20% от массы битума и скорость смешивания в диапазоне 1300–3750 об/мин (Dalhat and Al-Abdul Wahhab, 2017). Также известен полипропилен (ПП), на долю которого в настоящее время приходится 21% мирового производства пластика и 19,1% европейского производства пластика (“Plastics-the Facts 2016 An analysis of European plastics production, demand and waste data,” n.d.). Он обычно используется в автомобильных деталях, контейнерах, устойчивых к воздействию микроволновых печей, пищевой упаковке и трубах. ПП представляет собой термопластичный линейный углеводород с промежуточным уровнем кристалличности между HDPE и LDPE (Geyer et al., 2017).

Было обнаружено, что включение ПП в битум значительно изменяет свойства битума, модифицированного ПП. Модификация связующего ПП привела к повышению температуры размягчения при снижении значения пенетрации. Как упоминалось ранее, наиболее часто используемые концентрации ПП составляют 3–5%; наблюдалось снижение значения пенетрации между 18 и 30% для 3% ПП и между 38 и 50% для 5% ПП (Behnood and Modiri Gharehveran, 2019). Хотя в целом наблюдается отсутствие исследований, посвященных усталостным характеристикам асфальтовых смесей, модифицированных ПП, было доказано, что ПП является достаточно хорошим полимером – как в его первичной, так и в отходной форме - для модификации битума (Al-Abdul Wahhab et al., 2017).

Современное дорожное строительство требует повышения качества и долговечности асфальтобетонных покрытий, способных выдерживать климатические воздействия, высокие

нагрузки и интенсивную эксплуатацию. Битум, используемый в дорожном строительстве, обладает ограниченной термостойкостью и сопротивляемостью деформациям, что делает его модификацию актуальной задачей.

Использование вторичного полипропилена для модификации битума решает сразу несколько проблем: улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетона, снижение экологической нагрузки за счет переработки полимерных отходов и повышение экономической эффективности. Однако исследования влияния вторичных полимеров на свойства битума и асфальтобетонных покрытий все еще ограничены, а методы модификации требуют унификации и дальнейшего изучения. Эти аспекты делают исследование, направленное на разработку и внедрение битумно-полимерных вяжущих, актуальным как с научной, так и с практической точек зрения.

2. Материалы и методы

Для определения глубины проникания иглы при температуре 25°C (не менее 0,1 мм) проводились испытания в соответствии с СТ РК 1226–2003 с использованием автоматического цифрового пенетromетра Infracore модели 20–20670.

Для определения температуры размягчения по методу кольца и шара (°C, не ниже) был использован автоматизированный прибор Infracore, соответствующий стандарту СТ РК 1227–2003.

ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) применялась для идентификации функциональных групп в составе исследуемых образцов. Спектры были получены с использованием спектрометра IRTracer-100 SHIMADZU в диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Образцы полимеров (вторичный полипропилен, полипропиленовый мешок, пупырчатая пленка) анализировались в виде тонкой пленки с целью выявления характерных полос поглощения. Основное внимание уделялось идентификации колебаний C–H, C=O и других функциональных групп, указывающих на возможные структурные изменения в материале после модификации битума.

Для проведения исследований использовались следующие материалы:

1. Битум марки БНД 100/130, предоставленный ТОО «Павлодарский нефтехимический завод» (Казахстан), характеризуется высокой вязкостью и активно применяется в производстве дорожных покрытий. Данный битум обладает свойствами, обеспечивающими его эффективность в различных климатических условиях (таблица 1).

Таблица 1. Физико-химическая характеристика дорожного битума 100/130

Наименование показателя, единица измерения	Результаты
Пенетрация (25°C, 100 г, 5 сек, 0,1 мм)	111
Температура размягчения по КиШ (°C)	46
Растяжимость при 25°C, см	121
Температура хрупкости по Фраасу, °C	-26
Растворимость, °C	99,9
Содержание парафина, %	1
Изменение массы после нагрева, %	0,1
Изменение температуры размягчения, °C	5

2. Вторичный полипропилен, предоставленный ТОО «Компания Нефтехим LTD», представляет собой термопластичный материал на основе пропилена, переработанный из полимерных отходов (рисунок 1, таблица 2).

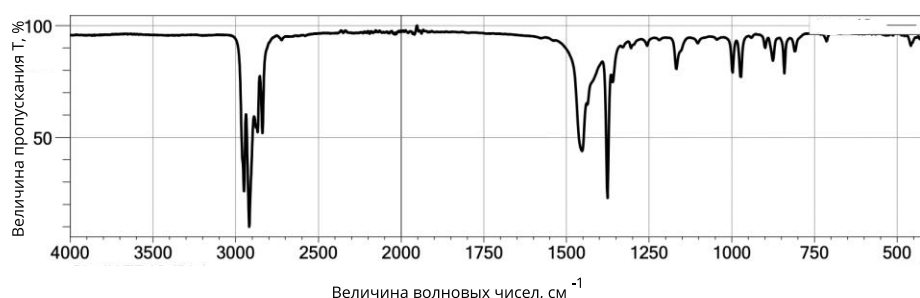


Рисунок 1. ИК-спектр поглощения вторичного полипропилена

Спектр показывает четкие полосы поглощения, характерные для различных типов полимеров, включая изотактический полипропилен (PP), сополимеры полиэтилена и пропилена (PE-PP) и другие сополимеры.

Таблица 2. Физико-химическая характеристика вторичного полипропилена

Наименование показателя, единица измерения	Результаты
Показатель текучести расплава, г/10 мин; груз 2,16 кг; фильера Ø 2,09 мм	5,50
Модуль упругости при растяжении, МПа	1480
Предел текучести при растяжении, МПа	31,30
Относительное удлинение при пределе текучести, %	9,8
Ударная вязкость по Изоду с надрезом, кДж/м ²	5,6
Модуль упругости при изгибе, МПа	1160
Массовая доля золы, %	2,65

Полосы поглощения в диапазоне 2950-2850 см⁻¹ соответствуют колебаниям С-Н связей, характерным для алкильных групп (-СН₂- и -СН₃), что свидетельствует о наличии углеводородной основы, типичной для полипропилена и полиэтилена. В области 1700–1600 см⁻¹ наблюдаются возможные полосы поглощения карбонильных групп (С=О), что может указывать на присутствие добавок или окисленных компонентов в смеси. Деформационные колебания метильных (-СН₃) и метиленовых (-СН₂-) групп проявляются в интервале 1450–1350 см⁻¹, являясь типичными сигналами для полиолефинов, включая полипропилен. Колебания связей С-О и С-С фиксируются в диапазоне 1170–1000 см⁻¹, что подтверждает наличие сополимеров или модифицированных полимерных структур. В области 900–800 см⁻¹ регистрируются характерные полосы, свидетельствующие о присутствии изотактического полипропилена в образце.

3. Полипропиленовый мешок (PP-мешок) – упаковочный материал, изготовленный из полипропилена. Обладает высокой механической прочностью и устойчивостью к влаге, широко используется для хранения и транспортировки сыпучих материалов (рисунок 2). В исследовании используется в качестве модифицирующей добавки к битуму.

Основными компонентами, выявленными в образце, являются полипропилен (изотактическая и атактическая формы) и полиэтиленовые компоненты, что подтверждается характерными полосами в области 800–1400 см⁻¹.

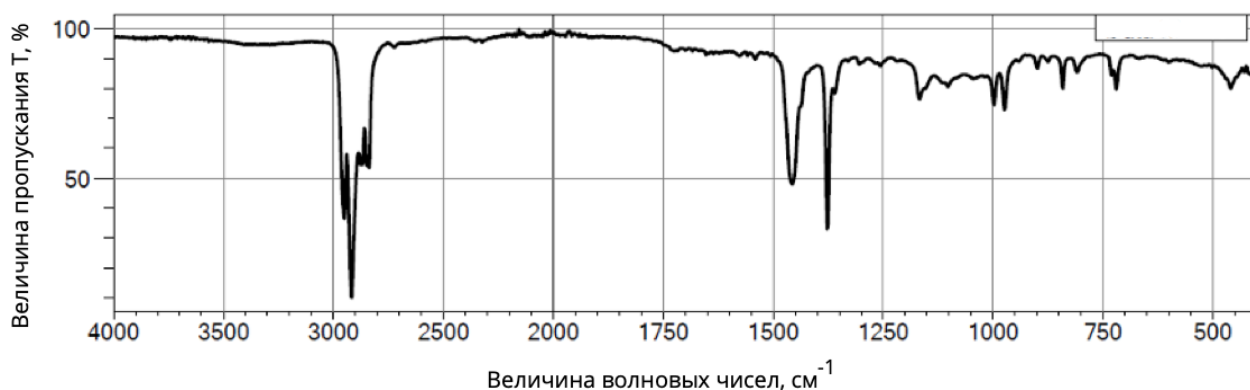


Рисунок 2. ИК-спектр поглощения полипропиленового мешка

4. Пупырчатая пленка (PE-пленка) – упаковочный материал из полиэтилена с воздушными пузырьками, обеспечивающий амортизационные свойства. Обладает высокой гибкостью, устойчивостью к влаге и химическим воздействиям. В исследовании применяется в качестве альтернативного модификатора битума.

На основе спектра идентифицированы основные компоненты образца (рисунок 3). Характерные полосы поглощения в диапазонах 2950–2850 см^{-1} , соответствующие симметричным и асимметричным колебаниям связей С-Н в алкильных группах, подтверждают наличие длинноцепочечных углеводородов. Обнаружены низко- и высокоплотный полиэтилен (LDPE, HDPE), что свидетельствует о смешанном составе материала, обеспечивающем механическую прочность и гибкость. Полосы поглощения в районе 1460–1370 см^{-1} подтверждают присутствие сополимеров этилена и пропилена (PE-PP), что может улучшать стойкость к нагрузкам и долговечность. Сильные полосы поглощения в диапазоне 1370–720 см^{-1} указывают на наличие микрокристаллических восков и парафинов, присутствие которых способствует улучшению гидрофобных свойств и термостойкости. Небольшие сигналы в районе 1700 см^{-1} могут свидетельствовать о наличии окисленных компонентов или стабилизаторов.

Спектральные данные подтверждают пригодность смеси для применения в полимерно-битумных композициях, обеспечивающих высокую устойчивость к климатическим и механическим нагрузкам.

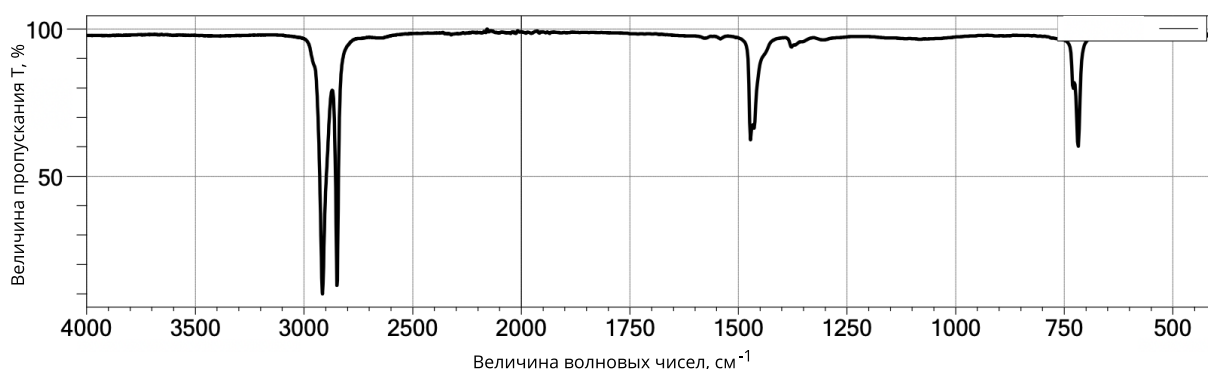


Рисунок 3. ИК-спектр поглощения пупырчатой пленки

3. Результаты

Технологический процесс производства полимерно-модифицированного битума (ПМБ) включает несколько последовательных стадий (рисунок 4). На первом этапе осуществляется подготовка битума, включающая его разогрев до рабочей температуры. Далее битум

нагревают до установленного температурного режима, обеспечивающего оптимальные условия для растворения и диспергирования полимерного модификатора. При достижении температуры 150°C вводят гранулированный полимерный модификатор. Процесс модификации осуществляется при интенсивном перемешивании в течение 120 минут, что необходимо для обеспечения равномерного распределения полимерной фазы в битумной матрице. После завершения процесса смешивания формируется полимерно-модифицированная битумная композиция, обладающая улучшенными эксплуатационными характеристиками.



Рисунок 4. Схема процесса получения полимерно-модифицированного битума с использованием полимерных отходов

Состав исследуемой полимер-модифицированной битумной (ПБВ) смеси включает битум марки БНД 100/130 и вторичный полипропилен в концентрациях от 2% до 6% (2%, 2.5%, 3%, 4%, 5%, 6%). В качестве альтернативных модификаторов использовались полипропиленовый мешок и пупырчатая пленка (таблица 3).

Таблица 3. Состав образцов ПБВ смеси

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	98%	97,5%	97%	96%	95%	94%
Вторичный полипропилен	2%	2,5%	3%	4%	5%	6%

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	97%	96%	95%
Полипропиленовый мешок (РР-мешок)	3%	4%	5%

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	97%	96%	95%
Пупырчатая пленка (РЕ-пленка)	3%	4%	5%

Для оценки термической стабильности модифицированных битумных композиций была проведена проверка температуры размягчения по методу КиШ. Полученные результаты показали, что температура размягчения увеличивается с увеличением концентрации вторичного полипропилена в смеси. Так, при концентрации полипропилена 2% температура размягчения составила 59,7°C, в то время как при концентрации 6% - 71,8°C (рисунок 5).

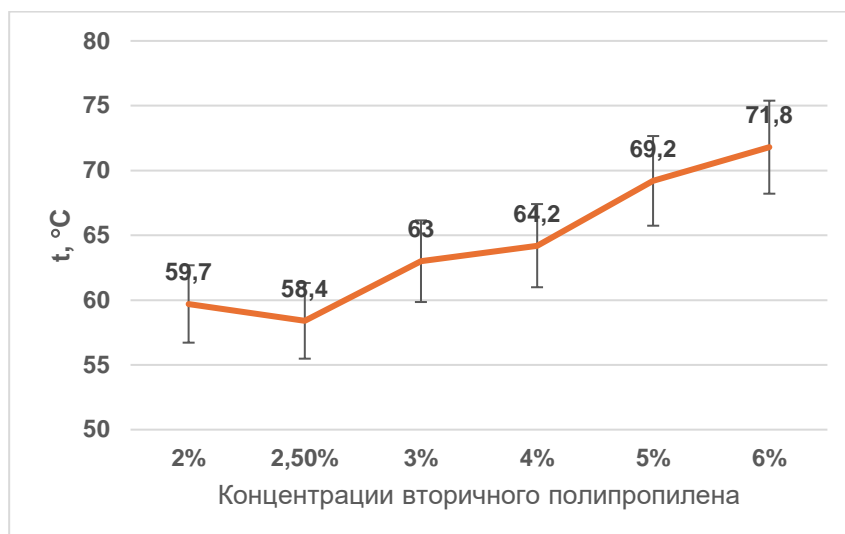


Рисунок 5. Зависимость температуры размягчения от концентрации вторичного полипропилена в битумной смеси

Это свидетельствует о том, что добавление полипропилена в битум значительно повышает его термическую устойчивость, что особенно важно для эксплуатации материалов в условиях высоких температур. Увеличение температуры размягчения на 12,1°C (с 59,7°C до 71,8°C) при добавлении полипропилена в концентрации 6% указывает на улучшение вязкости и жесткости материала, что может способствовать улучшению долговечности и эксплуатационных характеристик покрытия.

Показатели глубины проникновения иглы при 25°C для полимер-модифицированных битумных смесей показывают, что с увеличением концентрации вторичного полипропилена в смеси наблюдается тенденция к снижению глубины проникновения иглы. Это свидетельствует о повышении вязкости и уменьшении текучести материала, что является характерным для более жестких битумных смесей (рисунок 6).

Наибольшая глубина проникновения была зафиксирована при 2,5 % полипропилена, составившая 51,2 мм. Однако уже при концентрации 3% наблюдается значительное снижение глубины проникновения до 41,3 мм, что подтверждает улучшение эксплуатационных характеристик материала. С увеличением содержания полипропилена до 6%, глубина проникновения продолжает уменьшаться, достигнув значения 31,9 мм, что свидетельствует о дальнейшем повышении жесткости смеси и улучшении её устойчивости к механическим повреждениям.

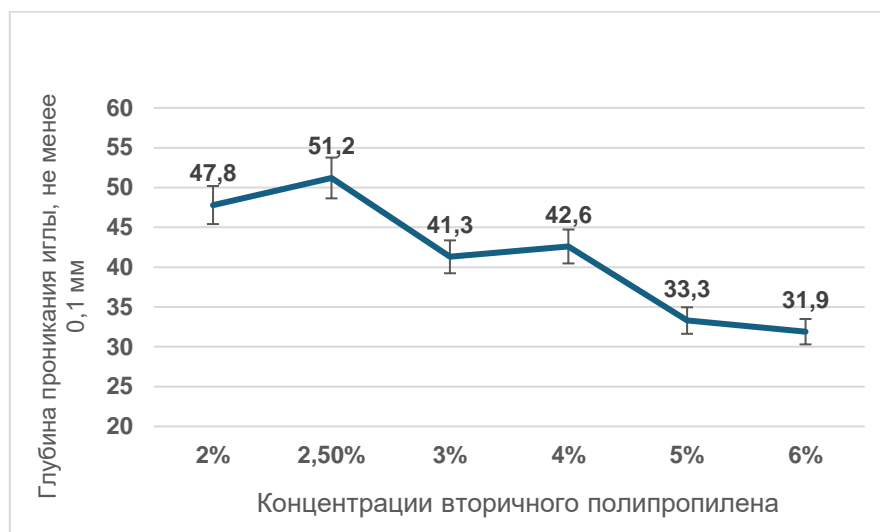


Рисунок 6. Зависимость глубины проникновения иглы при 25°C от концентрации вторичного полипропилена в битумной смеси

Таким образом, добавление вторичного полипропилена в битум значительно улучшает его характеристики, делая материал более стойким к деформациям, что особенно важно для использования в условиях повышенных нагрузок и высоких температур. Оптимальные результаты по снижению глубины проникновения были достигнуты при концентрации полипропилена в 4%, что может быть рекомендовано для улучшения долговечности битумных покрытий.

При исследовании смеси мешковины и битума по ключевым эксплуатационным показателям, таким, как глубина проникновения иглы при 25°C и температура размягчения по КиШ, были получены следующие результаты: температура размягчения для концентраций мешковины 3%, 4% и 5% составила 68,4°C, 69,4°C и 68,1°C соответственно, а глубина проникновения иглы при 25°C – 32,9 мм, 29,9 мм и 32,1 мм.

Эти результаты демонстрируют интересные особенности в поведении смеси с мешковиной. В частности, температура размягчения не проявляет значительных изменений в пределах исследованных концентраций. Все результаты остаются в близких диапазонах (около 68°C), что указывает на то, что добавление мешковины оказывает лишь незначительное влияние на термическую стабильность битума. Это может свидетельствовать о том, что мешковина не способна значительно улучшить термостойкость материала, как это ожидалось.

Что касается глубины проникновения иглы, то для всех концентраций мешковины наблюдается схожая картина (рисунок 7). В частности, при 4% концентрации глубина проникновения достигает 29,9 мм, что является наименьшим значением среди исследованных, но в целом данные остаются довольно высокими по сравнению с другими видами модификаторов. Это подтверждает, что смесь с мешковиной остается достаточно текучей и не приобретает той жесткости и вязкости, которые обычно ожидаются от полимерных добавок в битум.

Отсутствие резких изменений в результатах (например, пиков на графиках) может свидетельствовать о равномерном, но слабовыраженном влиянии мешковины на свойства смеси, что указывает на её ограниченную эффективность как модификатора. Это может быть связано с тем, что мешковина, будучи менее активным материалом, не взаимодействует с битумом так эффективно, как более специализированные полимеры. Визуальная стабилизация параметров также подтверждает, что модификация битума мешковиной не вызывает значительных улучшений в его эксплуатационных характеристиках.

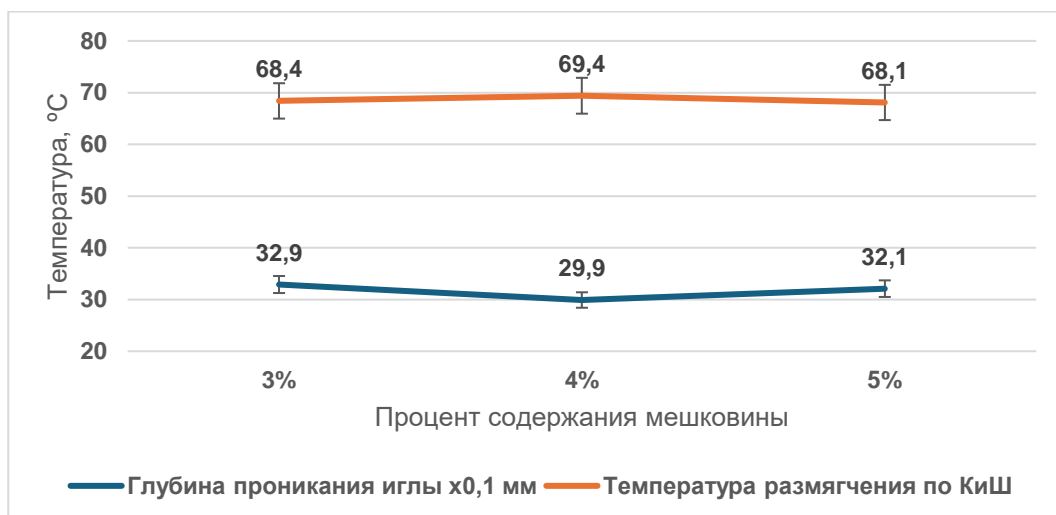


Рисунок 7. Зависимость температуры размягчения и глубины проникновения иглы от концентрации мешковины в битумной смеси

Таким образом, результаты показывают, что добавление мешковины в битум повышает его вязкость и термическую стабильность, но в меньшей степени по сравнению с более активными модификаторами, и не приводит к значительным улучшениям свойств смеси.

Результаты испытаний смеси битума с пупырчатой пленкой демонстрируют следующие значения: температура размягчения составляет 65,4°C, 69,4°C и 71°C при 3%, 4% и 5% содержании пленки соответственно, а глубина проникновения иглы при 25°C – 34,9 мм, 50,6 мм и 48,32 мм для тех же концентраций (рисунок 8).

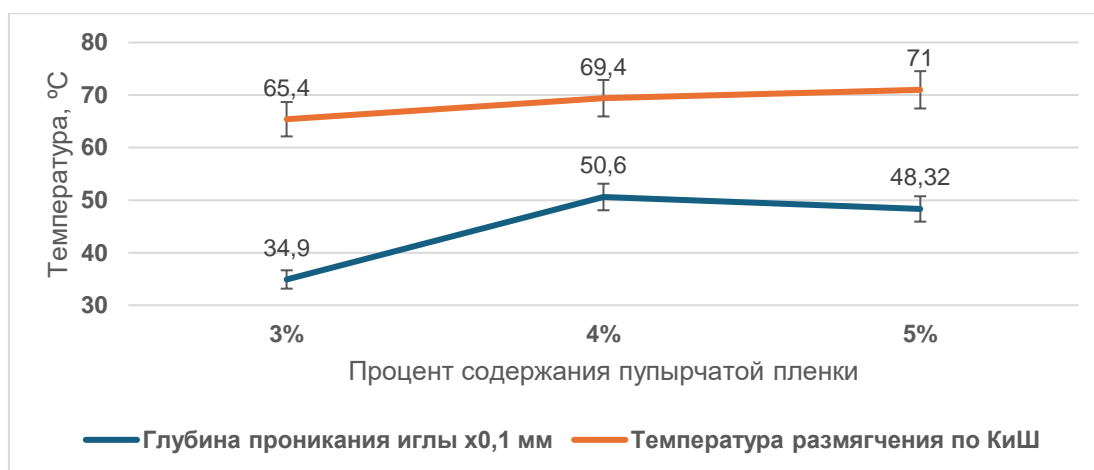


Рисунок 8. Влияние содержания пупырчатой пленки на температуру размягчения и глубину проникновения иглы

Сравнивая эти данные с результатами для смеси с мешковиной, можно отметить несколько важных различий. Во-первых, температура размягчения при использовании пупырчатой пленки показывает незначительное увеличение с ростом концентрации, однако в целом остается на уровне, сопоставимом с мешковиной. При 4% обе смеси демонстрируют одинаковое значение 69,4°C, но при 5% смесь с пупырчатой пленкой имеет более высокую температуру размягчения (71°C против 68,1°C у мешковины), что может свидетельствовать о лучшем структурировании битума при данной концентрации.

Однако глубина проникновения иглы показывает иную тенденцию. В случае с пупырчатой пленкой значения выше, особенно при 4% концентрации (50,6 мм), что указывает на большую пластичность смеси по сравнению с мешковиной. В свою очередь, битумная смесь с мешковиной демонстрировала меньшую глубину проникновения (29,9 мм при 4%), что говорит о большей жесткости и устойчивости материала.

Таким образом, несмотря на небольшое повышение температуры размягчения при 5% пупырчатой пленки, в целом модификация битума этим материалом приводит к более мягкой и менее устойчивой структуре по сравнению с мешковиной. Это может быть связано с тем, что пупырчатая пленка, будучи изготовленной из полиэтилена, обладает иной химической природой и взаимодействует с битумом слабее, чем полипропиленовая мешковина. В результате смесь с пупырчатой пленкой сохраняет более высокую пластичность, но при этом уступает по показателям жесткости и прочности, что может ограничивать её применение в условиях высоких нагрузок.

4. Обсуждение

Результаты показали, что вторичный полипропилен является наиболее эффективным модификатором среди исследованных материалов, так как он значительно повышает термостойкость и механическую прочность битумной смеси. Полипропиленовая мешковина обладает схожими, но менее выраженными характеристиками, тогда как пупырчатая полиэтиленовая пленка не дает значительного улучшения свойств битума.

Вторичный полипропилен оказывает наиболее выраженное влияние на свойства битума, повышая температуру размягчения до 71,8°C и снижая глубину проникновения иглы, что делает материал более жестким и устойчивым к нагрузкам.

Полипропиленовая мешковина также улучшает эксплуатационные характеристики битума, однако в меньшей степени по сравнению с чистым полипропиленом. Температура размягчения достигает 69,4°C, а глубина проникновения иглы уменьшается, но не столь значительно.

Пупырчатая полиэтиленовая пленка приводит к увеличению температуры размягчения, но её влияние на глубину проникновения иглы нестабильно. Это свидетельствует о слабом структурном взаимодействии полиэтилена с битумом и снижении вязкости материала.

Во вторичном полипропилене основным компонентом является комбинация PE и PP с минимальными добавками. Подходит для базовых композитных материалов благодаря высокой устойчивости к механическим нагрузкам.

Полипропиленовая мешковина содержит сополимеры PE и PP с функциональными добавками, что обеспечивает хорошую механическую прочность и устойчивость к износу. Подходит для полимерно-битумных вяжущих.

Пупырчатая полиэтиленовая пленка включает PE, парафины и микрокристаллические воски, обеспечивающие высокую гидрофобность и гибкость, но с ограниченной износостойкостью. Подходит для защитных покрытий и влагозащитных барьеров.

Для полимерно-битумных вяжущих оптимально использовать вторичный полипропилен, где наблюдаются устойчивые механические и термохимические свойства (Brasileiro et al., 2019; Celauro et al., 2020; Nizamuddin et al., 2021).

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наиболее эффективным модификатором является вторичный полипропилен, который обеспечивает наилучшие показатели термостойкости и механической прочности.

5. Заключение

Результаты исследования подтверждают возможность использования вторичных полимерных отходов в качестве модификаторов битума, что обусловлено их химической природой и способностью к взаимодействию с битумной матрицей. Введение вторичного полипропилена приводит к формированию гомогенной битумно-полимерной структуры за

счет частичного растворения и набухания полимерных цепей в дисперсионной среде битума. Это сопровождается увеличением температуры размягчения и снижением глубины проникновения иглы, что указывает на повышение когезионных свойств модифицированного вяжущего.

Наибольшую эффективность продемонстрировал вторичный полипропилен, обладающий высокой степенью совместимости с битумом благодаря его молекулярной массе и химическому составу. Полипропиленовая мешковина показала аналогичные, но менее выраженные результаты, что может быть связано с различиями в молекулярной организации и степени кристалличности материала. В отличие от полипропиленовых отходов, пупырчатая полиэтиленовая пленка не обеспечила значительных улучшений эксплуатационных характеристик битума, что обусловлено слабым химическим взаимодействием между полярными компонентами битума и неполярными полиэтиленовыми макромолекулами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются детальный анализ молекулярных и термодинамических аспектов взаимодействия полимеров с битумной матрицей, а также разработка комплексных составов, включающих поверхностно-активные вещества, пластификаторы и химические активаторы, способствующих улучшению диспергирования полимеров и повышению их совместимости с битумом.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, ресурсы, администрирование проекта; методология, получение финансирования, Г.С.; валидация, формальный анализ, исследование; написание – подготовка оригинального черновика, А.С.; редактирование, руководство, Л.Т.; визуализация, Е.Ж.

8. Информация об авторах

Сыздык Аяжан Галымкызы – магистрантка 2-го курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; ayazhanka.syzdyk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4435-0976>

Сейтенова Гайни Жумагалиевна – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Жакманова Екатерина Андреевна – докторант 3 курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; Ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

Толымбекова Лязат Байгабыловна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Химия», факультет естественных наук, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, 010000; tolyzbekova_lb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

9. Финансирование: Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № «BR24992883 Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны»).

10. Благодарности: Авторы выражают благодарность ОЮЛ «Ассоциация производителей и потребителей нефтегазохимической продукции (Нефтегазохимическая Ассоциация)» за поддержку и содействие в проведении данного исследования.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A., & Habib, M. A. (2017). Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 1117–1134. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1207554>
2. Behl, A., Sharma, G., & Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials*, 54, 113–117. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.050>
3. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2018.10.049>
4. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. del C. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646. <https://doi.org/10.3390/SU11030646>
5. Celauro, C., Saroufim, E., Mistretta, M. C., & La Mantia, F. P. (2020). Influence of short-term aging on mechanical properties and morphology of polymer-modified bitumen with recycled plastics from waste materials. *Polymers*, 12(9), 1985. <https://doi.org/10.3390/POLYM12091985>
6. Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(4), 349–357. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>
7. Dalhat, M. A., & Al-Adham, K. (2023). Review on laboratory preparation processes of polymer-modified asphalt binder. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 159–184. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2023.01.002>
8. García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., & Muñoz, M. E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled EVA-modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00217-5)
9. García-Travé, G., Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). Use of reclaimed geomembranes for modification of mechanical performance of bituminous binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001507](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001507)
10. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782/suppl_file/1700782_sm.pdf
11. Hossain, N., Zaini, J., Mahlia, T. M. I., & Azad, A. K. (2019). Elemental, morphological and thermal analysis of mixed microalgae species from drain water. *Renewable Energy*, 131, 617–624. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.07.082>
12. Ishag Obi, N., Najib Razali, M., & Hamid Nour, A. (2022). The potentials of emulsified modified bitumen (EMB) for coating and insulation: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1288–1295. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.598>
13. Joohari, I. B., & Giustozzi, F. (2020). Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123064. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123064>
14. Karmakar, S., & Roy, T. K. (2020). Influence of plastic waste on chemical and mechanical properties of modified bitumen used in the bituminous mix for flexible pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003545)

15. Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.04.196>
16. Lee, S., Park, Y. K., & Lee, J. (2023). Upcycling of plastic and tire waste toward use as modifier for asphalt binder. *Energy & Environment*, 35(4), 510–524. <https://doi.org/10.1177/0958305X231173999>
17. Maharaj, R., Maharaj, C., & Hosein, A. (2018). Performance of waste polymer modified road paving materials. *Journal of Elastomers & Plastics*, 34(1), 19–33. <https://doi.org/10.1177/147776061803400102>
18. Mazurek, G., Šrámek, J., & Buczyński, P. (2022). Composition optimisation of selected waste polymer-modified bitumen. *Materials*, 15(24), 8714. <https://doi.org/10.3390/MA15248714>
19. Nizamuddin, S., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. *Polymers*, 13(19), 3242. <https://doi.org/10.3390/POLYM13193242>
20. Plastics-the facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data. (n.d.).
21. Sarang, G., Lekha, B. M., Krishna, G., & Ravi Shankar, A. U. (2016). Comparison of stone matrix asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 933–945. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1124799>
22. Syrmanova, K. K., Botashev, E. T., Tleuov, D. B., Suleimenova, M. T., Eshankulov, A. A., & Kaldybekova, Z. B. (2017). Research of oil road bitumen modification with low density polyethylene. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(1), 470–477. <https://doi.org/10.13005/OJC/330155>
23. Tahmoorian, F., Samali, B., & Yeaman, J. (2018). Evaluation of structural and thermal properties of rubber and HDPE for utilization as binder modifier. In *Modified Asphalt*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.75535>
24. Wang, J., Yuan, J., Xiao, F., Li, Z., Wang, J., & Xu, Z. (2018). Performance investigation and sustainability evaluation of multiple-polymer asphalt mixtures in airfield pavement. *Journal of Cleaner Production*, 189, 67–77. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.208>
25. Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, 12, 100255. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100255>

Екіншілік полимерлердің полимер-модификацияланған битум қасиеттеріне әсерін талдау

Аяжан Сыздық, Гайни Сейтенова, Екатерина Жакманова, Лязат Толымбекова

Аңдатпа: Бұл жұмыста битумның екіншілік полипропиленмен модификациясы химиялық өзара әрекеттесу, құрылымдық өзгерістер және битум-полимер жүйесінің өнімділік сипаттамаларын жақсарту тұрғысынан қарастырылады. Битум матрицасында полимердің еру және дисперсия процестері, сонымен қатар полипропиленнің молекулалық құрылымының алынған композиттің реологиялық, жылу және механикалық қасиеттеріне әсері қарастырылады.

Битумды-полимерлі композицияларды дайындаудың негізгі кезеңдері, оның ішінде термиялық тұрақтандыру, гомогенизация, компоненттердің оңтайлы қатынасын анықтау және оларды араластыру әдістері сипатталған. Модификацияланған битумның физика-химиялық сипаттамаларының өзгеруіне талдау жүргізілді: жұмсарту температурасы және иненің ену тереңдігі 25°C.

Зерттеу нәтижелері қайталама полипропиленді енгізу ыстыққа төзімділікті арттыруға, тұтқырлықты арттыруға және битумның адгезиялық қасиеттерін жақсартуға көмектесетінін көрсетті. Бұл оны асфальтбетонды жабындарды кеңейтуге, олардың беріктігін және климаттық факторларға төзімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, полимерлі қоспаның әртүрлі концентрациясы (2%-дан 6%-ға дейін) және олардың битум байланыстырғыштың құрылымдық өзгерістеріне әсері зерттелді. Алынған деректер полипропиленнің оңтайлы концентрациясы пластикалық деформацияны азайту және механикалық беріктіктің жоғарылауы, жақсартылған өнімділік қасиеттерін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Екіншілік полипропиленді пайдалану жол төсемдерінің сапасын жақсартуға ғана емес, сонымен қатар полимер қалдықтарын қайта өңдеу мәселесін шешуге, қоршаған ортаға түсетін салмақты азайтуға мүмкіндік береді. Бұл битумды полимерлі түрлендіру саласында әрі қарай зерттеулер жүргізуге және анағұрлым экологиялық таза және берік асфальтбетон материалдарын әзірлеуге перспективалар ашады.

Сонымен қатар, полипропиленнің битум матрицасымен әрекеттесу механизмдері, соның ішінде молекулалық салмақтың, полимердің кристалдылық дәрежесінің және термиялық тұрақтылығының әсері қарастырылады. Әртүрлі типтегі қайталама полимерлермен модификацияланған битум қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізілді, бұл жол құрылысында пайдаланудың ең жақсы нұсқасын анықтауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: битум; екіншілік полипропилен; полимерлік қоспалар; полимер-битумды байланыстырғыш материалдар; модификация.

Analysis of the influence of secondary polymers on the properties of polymer-modified bitumen

Ayazhan Syzdyk, Gaini Seitenova, Ekaterina Zhakmanova, Lyazat Tolymbekova

Abstract: This paper examines the modification of bitumen with secondary polypropylene in terms of chemical interactions, structural changes, and improved performance of the bitumen-polymer system. The processes of polymer dissolution and dispersion in the bitumen matrix are considered, as well as the effect of the molecular structure of polypropylene on the rheological, thermal, and mechanical properties of the resulting composite.

The key stages of preparing bitumen-polymer compositions are described, including thermal stabilization, homogenization, determining the optimal ratio of components, and methods for mixing them. An analysis of changes in the physico-chemical characteristics of the modified bitumen is carried out: softening temperature and needle penetration depth at 25°C.

The results of the study showed that the introduction of secondary polypropylene helps to increase heat resistance, increase viscosity, and improve the adhesive properties of the bitumen. This allows for its expanded use in asphalt concrete pavements, improving their durability and resistance to climatic factors. Additionally, various concentrations of the polymer additive (from 2% to 6%) and their effect on structural changes in the bitumen binder were studied. The data obtained indicate that the optimal concentration of polypropylene provides improved performance properties, reducing plastic deformation and increasing mechanical strength.

The use of secondary polypropylene allows not only to improve the quality of road surfaces, but also to solve the problem of recycling polymer waste, reducing the burden on the environment. This opens up prospects for further research in the field of polymer modification of bitumen and the development of more environmentally friendly and durable asphaltic concrete materials.

In relation to this, the mechanisms of interaction between polypropylene and the bitumen matrix are considered, including the effect of molecular weight, degree of crystallinity and thermal stability of

the polymer. A comparative analysis of the properties of bitumen modified with various types of secondary polymers was carried out, which made it possible to identify the best option for use in road construction.

Keywords: bitumen; secondary polypropylene; polymer additives; polymer-bitumen binders; modification.

Contributions of Rural Tourism to Achieving the United Nations Sustainable Development Goals

İbrahim Aydın^{1*}, Hakan Önal¹

¹Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye; ibrahimaydin@balikesir.edu.tr,
onal@balikesir.edu.tr

*Correspondence: ibrahimaydin@balikesir.edu.tr

Abstract. Sustainable tourism is an approach that aims to protect natural resources, support local cultures, and ensure the fair distribution of economic benefits (UNWTO, 2020). This approach seeks to ensure the long-term balanced development of tourism, both environmentally and socio-culturally. Rural areas hold great potential for sustainable tourism. These regions host unique resources such as historical structures, traditional housing types, and rich cultural heritage. Particularly, rural tourism can contribute to the economic empowerment of local communities, the preservation of cultural values, and the sustainable use of the natural environment. However, effective utilization of this potential requires proper planning, management, and local participation. This study aims to examine how historical structures, traditional housing types, and cultural features in rural areas can be evaluated within the scope of sustainable tourism. Additionally, the challenges and solutions encountered in the process of preserving and integrating these resources into tourism will be discussed. Since sustainable tourism targets not only environmental but also social and economic sustainability, this study will also delve into the relationship between rural development and tourism.

Keywords: sustainability, tourism, rural development, rural tourism, cultural values.

Citation: Aydın, İ., Önal, H. (2025). Contributions of Rural Tourism to Achieving the United Nations Sustainable Development Goals. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 150(1), 82-93. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-82-93>

Academic editor:
N.Ye. Ramazanova

Received: 01.03.2025
Revised: 04.03.2025
Accepted: 11.03.2025
Published: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introduction

Tourism is a phenomenon that encompasses the travel of individuals from their place of residence to another region for a certain period for various purposes such as relaxation, entertainment, cultural experiences, or business, along with the activities related to this process (World Tourism Organization [WTO], 2021). The tourism sector plays a crucial role in economic development and social interaction by bringing together various industries and services (Hall & Page, 2019). Moreover, tourism has significant social, cultural, and economic impacts on both individuals and societies.

The history of tourism dates back to ancient times, as people in ancient Greece and Rome traveled to events such as the Olympics or sacred temples (Towner, 1996). In the Middle Ages, travels were mostly for religious purposes pilgrimages and trade. In the 18th century, the "Grand Tour" tradition became popular among aristocrats and wealthy

individuals in Europe (Black, 2003). However, modern tourism emerged after the Industrial Revolution with advancements in transportation technology (Shaw & Williams, 2002). In the 19th century, the expansion of railway networks and the use of steamships made tourism more accessible (Page, 2019). In the 20th century, the development of air transportation turned tourism into a global industry.

Today, tourism is one of the most important sectors of the world economy. According to UNWTO data, the tourism sector accounts for approximately 10% of global GDP and provides employment to millions of people (UNWTO, 2020). Particularly for developing countries, tourism plays a critical role in economic development and foreign exchange earnings. However, the environmental and cultural impacts of tourism have increasingly become a topic of discussion. Sustainable tourism practices have gained importance to minimize these impacts and ensure the long-term benefits of tourism (Hall & Page, 2020).

Tourism, being a significant phenomenon at both individual and societal levels, and has evolved over time into a global industry. However, sustainability and responsible tourism practices are crucial for the future of tourism.

Initially concentrated in major cities, famous destinations, and coastal areas, tourism has gradually expanded to rural areas, driven by the increasing interest in nature and tranquil environments (Lane & Kastenholtz, 2015). Particularly, alternative tourism types such as agritourism, ecotourism, and cultural tourism have gained importance in rural areas (Roberts & Hall, 2001). The spread of tourism to rural areas has been accelerated by various economic, social, and technological factors. Especially, increasing urbanization and the stress of city life have directed individuals towards more peaceful and natural environments (MacDonald & Jolliffe, 2003). Additionally, the cultural heritage, authentic experiences, and natural beauty of rural areas have attracted tourists and promoted regional development (Lane, 2009). In this sense, one of the most important reasons for the spread of rural tourism can be attributed to the concept of sustainable tourism. Environmental sensitivity and the preservation of natural resources have led tourism to focus on rural areas (Sharpley & Roberts, 2004). Moreover, modern transportation and communication technologies have made rural areas more accessible, and accommodation and infrastructure services in these regions have developed (Bramwell & Lane, 2011).

Government support and incentives from local authorities have also played a significant role in the development of rural tourism, thereby supporting small businesses, promoting ecological agriculture, and enhancing the appeal of rural tourism through regional festivals and events (Phillip et al., 2010). Additionally, the widespread use of social media and digital marketing tools has facilitated the promotion of rural destinations, increasing tourist numbers as a result of these promotions (Bessière, 1998).

2. Materials and methods

Rural areas, with their natural beauty, historical structures, traditional lifestyles, and cultural richness, hold great potential for tourism. Rural tourism aims to promote the sustainable use of these resources, benefiting both local communities and the tourism sector. The importance of rural tourism can be examined in economic, social, and environmental dimensions.

Rural tourism can particularly stimulate economic revival in regions where traditional agriculture and livestock activities have declined. Local communities can generate income through accommodation facilities, local cuisine, handicrafts, and guiding services (Sharpley & Vass, 2006). Additionally, rural tourism can reduce unemployment rates, prevent youth migration, and strengthen the local economy.

Rural tourism is also crucial for the preservation and promotion of local culture. Tourists experience traditional lifestyles, local festivals, and handicrafts in rural areas, leading to cultural interaction (Kastenholtz et al., 2012). This helps local communities preserve their cultural identity

and take pride in it. Moreover, the interaction between tourists and locals fosters mutual understanding and tolerance.

Rural tourism can also contribute to the preservation of the natural environment. Tourism activities can promote the sustainable use of natural resources and increase environmental awareness (Lane, 1994). For example, ecotourism projects can protect forests, rivers, and other natural areas. Additionally, rural tourism can encourage the adoption of environmentally friendly practices, such as the use of renewable energy and waste management (Lane, 1994).

The tourism sector is enriched by unique resources such as historical structures, traditional housing types, and cultural features. These elements attract tourists, contributing to the preservation of cultural heritage and the revitalization of local economies. Historical structures, such as castles, mosques, churches, bridges, and ancient cities, attract tourists and promote cultural tourism (Timothy & Boyd, 2003). For example, the ancient city of Ephesus in Turkey and the underground cities in Cappadocia demonstrate how historical structures can be effectively used in tourism. Such structures not only attract tourists but also help local communities take pride in their past and preserve cultural heritage (Ashworth & Tunbridge, 2000).

However, caution is needed when integrating historical structures into tourism. Excessive tourism pressure can lead to the deterioration and destruction of these structures. Therefore, restoration efforts and visitor management strategies are crucial for the preservation and sustainable integration of historical structures into tourism (Hall & McArthur, 1998).

Traditional housing types, which reflect the architectural features and lifestyles of a region, are also important cultural heritage elements that contribute to the development of tourism in rural areas. Particularly, wooden houses, stone structures, and local mansions in rural areas attract tourists. These structures can be converted into boutique hotels or guesthouses for tourism purposes (Lane, 1994). For example, the historical houses in Safranbolu (Türkiye), demonstrate how traditional housing types can be integrated into tourism. The popularity of these houses, attracting visitors from around the world, has been significantly influenced by social media shares.



Figure 1: Safranbolu Houses, Turkey (Source: Anadolu Agency)

Traditional housing types not only provide accommodation but also offer tourists an authentic experience. This experience encourages the preservation of local architecture and increases tourists'

interest in the region (Richards, 2007). Additionally, the integration of such structures into tourism contributes to the economic empowerment of local communities. One of the best examples of this is the Button Houses in the Ormana neighborhood of İbradı district in Antalya, Turkey (Figure 2). The sharing of these houses on social media has led to a surge in rural tourism activities, highlighting the importance of rural development.



Figure 2: Button House (İbradı/Antalya) Source: İbradı.gov.tr

Cultural features, such as local festivals, handicrafts, traditional music and dances, and local cuisine, also play a significant role in attracting tourists and shaping a region's identity. These features offer tourists unique experiences (McKercher & du Cros, 2002). For example, the Kırkpınar Oil Wrestling Festival in Edirne and grape festivals in Nevşehir, Turkey, demonstrate how cultural features can be utilized in tourism.

Cultural tourism not only helps preserve the cultural identity of local communities but also encourages the ownership and long-term preservation of these cultural features by the locals. Additionally, the interaction between tourists and locals fosters cultural understanding and tolerance (Richards, 2001). However, it is crucial to prevent the commercialization of cultural features and preserve their authenticity when integrating them into tourism.

The Sustainable Development Goals (SDGs), developed by the United Nations (UN), are a call to action consisting of 17 universal goals aimed at ending poverty, protecting the planet, and ensuring that all people live in peace and prosperity. These goals were established as part of the 2030 Agenda for Sustainable Development, adopted by UN member states in 2015. The 17 goals outline the steps needed to ensure a sustainable future globally and require collaboration among all countries to achieve them. These goals are shown in Figure 3, and the following section explains the goals related to tourism and their connections.



Figure 3. United Nations Sustainable Development Goals

Tourism is directly or indirectly linked to multiple Sustainable Development Goals. Sustainable tourism practices play a significant role in areas such as economic growth, environmental protection, social development, and the preservation of cultural heritage. Therefore, the tourism sector should be considered a key tool in achieving the SDGs (Ar & Çelik Uğuz, 2017). The relationship between the SDGs and the tourism sector is explained in Table 1.

Table 1. United Nations Sustainable Development Goals and Their Relationship with Tourism

SDG 5. Gender Equality	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>The tourism sector can increase women's participation in the workforce. Particularly in developing countries, tourism is an important employment area for women.</i> ➤ <i>Additionally, tourism projects can support policies promoting gender equality.</i>
SDG 8. Decent Work and Economic Growth	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism is a significant source of employment and income, especially in developing countries.</i> ➤ <i>Sustainable tourism revitalizes local economies and creates decent work opportunities.</i> ➤ <i>The tourism sector also contributes to the growth of small and medium-sized enterprises (SMEs).</i>
SDG 9. Industry, Innovation, and Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism promotes infrastructure development (transportation, accommodation, communication).</i> ➤ <i>Sustainable tourism supports the construction of resilient and environmentally friendly infrastructure.</i> ➤ <i>Additionally, technological innovations in the tourism sector (e.g., digital reservation systems) can increase efficiency.</i>
SDG 11. Sustainable Cities and Communities	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism contributes to the preservation of cultural heritage and the development of local communities.</i> ➤ <i>Sustainable tourism improves the quality of life for locals while preserving cultural and historical heritage.</i> ➤ <i>Additionally, tourism enhances urban infrastructure and promotes sustainability in urban planning.</i>

SDG 12. Responsible Consumption and Production	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism requires the responsible use of resources. Sustainable tourism practices promote the conservation of natural resources and waste management.</i> ➤ <i>Tourism businesses can support responsible consumption by adopting environmentally friendly practices such as energy and water conservation.</i>
SDG 13. Climate Action	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>The tourism sector plays a significant role in combating climate change.</i> ➤ <i>Sustainable tourism practices encourage reducing carbon footprints and using renewable energy.</i> ➤ <i>For example, steps can be taken to reduce emissions from air travel or promote the use of eco-friendly hotels.</i>
SDG 14. Life Below Water	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Coastal and marine tourism is directly related to the protection of oceans and marine resources.</i> ➤ <i>Sustainable tourism promotes the conservation of marine ecosystems and prevents pollution.</i> ➤ <i>For example, diving tourism or marine protected areas can contribute to the preservation of underwater life.</i>
SDG 15. Life on Land	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism is related to the conservation of forests, mountains, and other terrestrial ecosystems.</i> ➤ <i>Nature tourism and ecotourism promote the preservation of biodiversity.</i> ➤ <i>However, tourism can also lead to the destruction of natural areas, making the adoption of sustainable practices critical.</i>
SDG 17. Partnerships for the Goals	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Tourism is an important area for international cooperation and partnerships.</i> ➤ <i>Sustainable tourism projects can be implemented through public private partnerships and the support of international organizations.</i>

The tourism sector has increasingly focused on the concept of sustainability in recent years. Global issues such as climate change, environmental degradation, and social inequalities have highlighted the need for sustainable tourism practices. This section discusses recent studies and developments on the sustainability of tourism.

The Spread of Sustainable Tourism Practices

In recent years, the spread of sustainable tourism practices has been notable. Particularly, models such as ecotourism, agritourism, and cultural tourism contribute to the preservation of natural and cultural resources while benefiting local economies (Gössling et al., 2021; Yurtsal, 2019). These practices increase tourists' environmental awareness and encourage eco-friendly travel choices.

Technological advancements have a significant impact on the sustainability of tourism. Digitalization enables more efficient use of resources in the tourism sector while minimizing tourists' environmental impacts (Gretzel et al., 2020). For example, online reservation systems, virtual tourism experiences, and smart tourism applications enhance the sustainability of tourism.

The active participation of local communities in tourism activities is crucial for the success of sustainable tourism. Recent studies show that local participation increases the social acceptance of tourism activities and ensures the fair distribution of economic benefits (Scheyvens & Biddulph, 2018). Additionally, training local communities on tourism strengthens the sustainability of tourism activities.

Climate change poses a significant threat to the tourism sector. Recent studies emphasize the need to develop strategies to minimize the environmental impacts of tourism activities (Scott et al., 2019). For example, the use of renewable energy sources, waste management, and water conservation in tourism facilities reduce the environmental impacts of tourism.

The adoption of appropriate policies and management strategies is essential for the development of sustainable tourism. Recent studies show that collaboration between local and

central governments enhances the sustainability of tourism activities (Hall, 2019). Additionally, financial support and incentives are needed to implement sustainable tourism policies.

Tourists' attitudes and behaviors towards sustainable tourism practices significantly impact the sustainability of tourism. Recent studies indicate that as tourists' environmental awareness increases, so does their preference for eco-friendly travel (Dolnicar, 2020). This trend encourages the spread of sustainable practices in the tourism sector.

The COVID-19 pandemic has also significantly impacted the tourism sector. During the pandemic, the environmental impacts of tourism activities decreased (Gössling et al., 2021). However, new strategies are needed to sustainably revive tourism in the post-pandemic period. Particularly, promoting local tourism and eco-friendly travel choices is crucial for the sustainability of tourism.

Sustainable Tourism Practices: Principles, Local Participation, and Environmental Impacts.

Sustainable tourism is an approach that aims to protect natural resources, preserve cultural heritage, and strengthen local economies. This approach seeks to balance tourism activities environmentally, socially, and economically (UNWTO, 2020). Sustainable tourism practices are shaped by certain principles, and local participation and minimizing environmental impacts are of great importance.

3. Results

Sustainable tourism is based on the following principles:

Environmental Sustainability: The protection of natural resources and minimizing the negative environmental impacts of tourism activities are essential. Practices such as energy conservation, waste management, and biodiversity preservation are prioritized (Buckley, 2012).

Social and Cultural Sustainability: The preservation of local cultures and ensuring that tourism activities do not negatively affect the lifestyles of local communities are key goals. Cultural interaction between tourists and locals is encouraged while preventing the commercialization of cultural heritage (Richards, 2007).

Economic Sustainability: The fair distribution of income generated from tourism activities and the strengthening of local economies are aimed at. This ensures that the tourism sector becomes a sustainable source of income in the long term (Sharpley, 2009).

The active participation of local communities is crucial for the success of sustainable tourism practices. Local communities should have a say in the planning, implementation, and management of tourism activities (Tosun, 2000). This participation can be achieved through:

Local Employment: Employing locals in the tourism sector ensures that economic benefits directly reach the community.

Local Entrepreneurship: Encouraging locals to engage in tourism-related ventures, such as accommodation facilities and local restaurants.

Education and Awareness: Providing training to local communities on sustainable tourism principles and raising awareness about the long-term benefits of tourism (Scheyvens, 2002).

The Participation of Local Communities and the Future of Rural Tourism

The participation of local communities increases the social acceptance of tourism activities and strengthens the sustainability of tourism. However, on the other hand, the increase in tourism activities can also have negative impacts on the natural environment. To minimize these impacts, Buckley (2012) emphasizes the need to encourage the use of renewable energy sources and water-saving systems in tourism facilities. Additionally, the recycling of waste generated by tourism activities and its environmentally friendly disposal, as well as the development of visitor management strategies to reduce the pressure of tourism activities on natural areas, are essential (Hall & McArthur, 1998). For example, limiting the number of visitors in protected areas and promoting nature-friendly activities are just some of the practices that can be implemented to achieve these goals.

For sustainable tourism practices to succeed by offering a balanced tourism model in environmental, social, and economic terms, the adoption of fundamental principles, the active involvement of local communities, and the minimization of environmental impacts are of great importance. Sustainable tourism is an approach that aims to meet the needs of the present while protecting the resources of future generations.

4. Discussion

Rural tourism holds significant potential for the tourism sector with its natural beauty, cultural heritage, and traditional lifestyles. However, the sustainable realization of this potential requires the adoption of appropriate policies and strategies. The future of rural tourism will be shaped by balancing local community participation, environmental protection, and economic development.

The future of rural tourism will be shaped within the framework of sustainability principles. In particular, the preservation of natural resources, the safeguarding of cultural heritage, and the strengthening of local economies will ensure the long-term success of rural tourism (Lane, 1994). Additionally, technological advancements and digitalization offer new opportunities for the promotion and management of rural tourism. For example, virtual tourism and online reservation systems can help rural areas reach wider audiences (Gretzel et al., 2015). However, the ease of access also brings significant challenges, such as increased tourist pressure, disruptions in goods and services, and potential problems that may arise. To overcome these challenges, certain rules must be established in advance. For instance, the following policy recommendations should be considered for the sustainability of rural tourism:

Empowerment of Local Communities: The active participation of local communities in tourism activities should be ensured, and the fair distribution of economic, social, and cultural benefits should be promoted (Tosun, 2000). Local entrepreneurship should be supported, and tourism-related training programs should be expanded.

Environmental Protection Policies: Environmental protection policies should be developed to minimize the negative impacts of rural tourism activities on the natural environment. Practices such as waste management, energy conservation, and the protection of natural areas should be prioritized (Buckley, 2012).

Infrastructure and Transportation Investments: Infrastructure and transportation investments are crucial for the development of tourism in rural areas. Basic needs such as roads, communication networks, and clean water sources must be met (Sharpley, 2009).

Promotion and Marketing Strategies: Effective marketing strategies should be developed to promote rural tourism. Digital marketing, social media, and international collaborations can play a significant role in promoting rural areas (Gretzel et al., 2015).

Of course, the desire to implement policy decisions in a particular area does not necessarily mean that these decisions are directly applicable. Therefore, implementation strategies must also be determined for the adopted policy decisions. To ensure the implementation of policy decisions for the sustainability of rural tourism, the following implementation strategies are recommended:

Local and Central Collaboration: Collaboration between local governments, central governments, and non-governmental organizations should be ensured. This collaboration will enable the effective use of resources and the success of projects (Hall, 2008).

Sustainable Tourism Models: Sustainable tourism models such as ecotourism, agritourism, and cultural tourism should be promoted. These models contribute to the preservation of natural and cultural resources while benefiting local economies (Lane, 1994).

Visitor Management: Visitor management strategies should be developed to minimize the impact of tourists in rural areas. For example, limiting the number of visitors in protected areas and promoting nature-friendly activities should be prioritized (Buckley, 2012).

5. Conclusion

In conclusion, rural tourism holds great importance in terms of economic development, cultural preservation, and environmental sustainability. However, the effective realization of this potential requires proper planning, the participation of local communities, and the adoption of sustainable tourism principles. Historical structures, traditional housing types, and cultural features offer significant potential for the tourism sector. These elements provide tourists with unique experiences while contributing to the preservation of cultural heritage and the revitalization of local economies. However, the sustainable use of these resources requires proper planning, conservation strategies, and the participation of local communities.

By balancing the participation of local communities, environmental protection, and economic development, the future of rural tourism can be secured. In this process, collaboration between local and central governments, the promotion of sustainable tourism models, and effective marketing strategies are of great importance.

Tourism activities, which are an important source of income for countries and play a significant role in rural development and local retention, require not only expansion into rural areas but also planned progress and control. To achieve tourism goals in rural development, the first step should be to increase the participation of local communities. This can be done by providing tourism-related training to locals, teaching them how to participate in tourism activities. For example, capacity building can be achieved through training in areas such as guiding, handicraft production, or the presentation of local cuisine.

Encouraging locals to establish small businesses, such as boutique hotels, local restaurants, or handicraft workshops, can support local entrepreneurship. At the same time, ensuring the active participation of locals in tourism-related decision-making processes can increase the social acceptance of tourism activities. While doing this, it is also necessary to improve transportation, provide basic services to the region, and establish eco-friendly accommodation facilities or upgrade existing ones. This way, the contribution of infrastructure facilities to rural development will also become evident.

In addition to the participation of local communities, eco-tourism, agritourism, and cultural tourism should also be included in the rural tourism sector. Instead of seeking entirely new activities, organizing experiences such as farm stays, participation in agricultural activities, traditional handicraft workshops, or collaborative cooking of local dishes can be suitable. This will ensure a sustainable tourism model.

Promotion is undoubtedly the most important element in the marketing and branding of local products. Therefore, it is recommended to use digital marketing methods for the promotion of festivals and events.

Marketing methods should reflect activities that are attractive to potential visitors. For example, offering tourists the opportunity to experience local lifestyles through farm stays, traditional handicraft workshops, interactive experiences such as cooking local dishes together, or nature activities like hiking, cycling tours, and birdwatching can be effective.

Even if all necessary steps are taken for the development and sustainability of rural tourism, it is essential to establish an artificial intelligence-supported database to record complete and planned activities. This database will help identify the reasons behind changes in tourist numbers and anticipate the opportunities and risks that future tourist increases may bring.

6. Supplementary Materials: No Supplementary Materials.

7. Authors' contributions: In this study, both authors have equal contributions.

8. Author Information

İbrahim Aydın – Professor, Dean of the Faculty of Necatibey Education, Balıkesir University, Çağış Campus (Bigadic on the way 17. km), Balıkesir, Türkiye, 10145; ibrahimaydin@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0146-5566>

Hakan Önal – corresponding author, Professor, Head of the Turkish and Social Sciences Educations Department, Faculty of Necatibey Education, Balıkesir University, Çağış Campus (Bigadic on the way 17. km), Balıkesir, Türkiye, 10145; onal@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8434-9880>

9. Funding: This research received no external funding.

10. Acknowledgements: The authors express their gratitude to Balıkesir University, where the work on the preparation of this scientific article was carried out.

11. Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Ar, H., & Çelik Uğuz, S. (2017). Küresel sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde turizmin rolü: Türkiye örneği. *Journal of International Social Research*, 10(49): 521-530. <https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1604>
2. Ashworth, G. J., & Tunbridge, J. E. (2000). The tourist-historic city: Retrospect and prospect of managing the heritage city. Pergamon.
3. Bessière, J. (1998). Local development and heritage: Traditional food and cuisine as tourist attractions in rural areas. *Sociologia Ruralis*, 38(1), 21-34.
4. Black, J. (2003). The British and the Grand Tour. Routledge.
5. Bramwell, B., & Lane, B. (2011). Critical research on rural tourism and sustainable development. *Tourism Management*, 32(6), 1219-1222.
6. Buckley, R. (2012). Sustainable tourism: Research and reality. *Annals of Tourism Research*, 39(2), 528-546. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2012.02.003>
7. Dolnicar, S. (2020). Designing for more environmentally friendly tourism. *Annals of Tourism Research*, 84, 102933. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2020.102933>
8. Gössling, S., Scott, D., & Hall, C.M. (2021). Pandemics, tourism and global change: A rapid assessment of COVID-19. *Journal of Sustainable Tourism*, 29(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1758708>
9. Gretzel, U., Sigala, M., Xiang, Z., & Koo, C. (2020). Smart tourism: Foundations and developments. *Electronic Markets*, 25(3), 179-188.
10. Hall, C. M., & Page, S. J. (2019). The geography of tourism and recreation: Environment, place and space. Routledge.
11. Hall, C. M., & McArthur, S. (1998). Integrated heritage management: Principles and practice. Stationery Office.
12. Kastenzholz, E., Carneiro, M. J., & Marques, C. P. (2012). Marketing the rural tourism experience. In *Rural tourism and sustainable business* (pp. 85-102). Channel View Publications.
13. Kuter, N., & Ünal, H. E. (2013). Kırsal Kalkınmada Kırsal Turizmin Önemi. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 13(2), 192-201.
14. Lane, B. (1994). Sustainable rural tourism: Strategies for rural development. Routledge.
15. Lane, B. (2009). Rural tourism: An overview. *The Sage handbook of tourism studies*, 354-370.
16. Lane, B., & Kastenzholz, E. (2015). Rural tourism: The evolution of practice and research approaches - towards a new generation concept? *Journal of Sustainable Tourism*, 23(8-9), 1133-1156.

17. MacDonald, R., Jolliffe, L. (2003). Cultural rural tourism. *Annals of Tourism Research*, 30(2), 307-322.
18. McKercher, B., & du Cros, H. (2002). Cultural tourism: The partnership between tourism and cultural heritage management. Routledge.
19. Phillip, S., Hunter, C., & Blackstock, K. (2010). A typology for defining agritourism. *Tourism Management*, 31(6), 754-758.
20. Richards, G. (2001). Cultural attractions and European tourism. *Tourism Management*, 22(1), 27-38. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(00\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(00)00029-9)
21. Richards, G. (2007). Cultural tourism: Global and local perspectives. Haworth Press.
22. Roberts, L., & Hall, D. (2001). Rural tourism and recreation: Principles to practice. CABI.
23. Sachs, J. D. (2015). The Age of Sustainable Development. Columbia University Press.
24. Scheyvens, R. (2002). Tourism for development: Empowering communities. Pearson Education.
25. Scheyvens, R., & Biddulph, R. (2018). Inclusive tourism development. *Tourism Geographies*, 20(4), 589-609. <https://doi.org/10.1080/14616688.2017.1387765>
26. Scott, D., Gössling, S., & Hall, C. M. (2019). Global tourism vulnerability to climate change. *Annals of Tourism Research*, 77, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.05.007>
27. Sharpley, R., & Vass, A. (2006). Tourism, farming and diversification: An attitudinal study. *Tourism Management*, 27(5), 1040-1052. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.10.025>
28. Sharpley, R., & Roberts, L. (2004). Rural tourism: Between theory and practice. In *Tourism and development: Concepts and issues* (pp. 117-134). Channel View Publications.
29. Shaw, G., & Williams, A. M. (2002). Critical issues in tourism: A geographical perspective. Blackwell Publishers.
30. Timothy, D. J., & Boyd, S. W. (2003). Heritage tourism. Pearson Education.
31. Tosun, C. (2000). Limits to community participation in the tourism development process in developing countries. *Tourism Management*, 21(6), 613-633. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(00\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(00)00009-3)
32. Towner, J. (1996). An historical geography of recreation and tourism in the Western world 1540-1940. Wiley.
33. United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Sustainable Development Goals (SDGs). Erişim adresi: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
34. UNWTO. (2020). Sustainable development. World Tourism Organization. <https://www.unwto.org/sustainable-development>
35. Urry, J., & Larsen, J. (2011). The tourist gaze 3.0. SAGE Publications.
36. World Tourism Organization. (2021). International tourism highlights 2021 edition. UNWTO.
37. Yurtsal, K. (2019). Türkiye’de sürdürülebilir turizm. *Sivas Interdisipliner Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4, 61-70.

Біріккен Ұлттар Ұйымының Тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізудегі ауылдық туризмнің үлесі

Ибрагим Айдын, Хақан Онал

Аңдатпа: Туризм экономикалық өсу, мәдени өзара әрекеттесу және әлеуметтік даму тұрғысынан әлемдегі маңызды сектор болып табылады. Дегенмен, туризмнің қарқынды өсуі қоршаған ортаның нашарлауы, мәдени эрозия және ресурстарды шамадан тыс пайдалану сияқты жағымсыз салдарға әкелуі мүмкін. Бұл жағдай туристік қызметті тұрақты түрде жүргізу қажеттілігін көрсетті. Тұрақты туризм – табиғи ресурстарды қорғауға, жергілікті мәдениеттерді қолдауға және экономикалық пайданы әділ бөлуді қамтамасыз етуге

бағытталған тәсіл [1]. Бұл тәсіл туризмнің экологиялық және әлеуметтік-мәдени тұрғыдан ұзақ мерзімді теңгерімді дамуын қамтамасыз етуге бағытталған. Ауылдық аймақтардың тұрақты туризмнің әлеуеті зор. Бұл аймақтарда тарихи ғимараттар, дәстүрлі тұрғын үй түрлері және бай мәдени мұра сияқты бірегей ресурстар бар. Бұл зерттеудің мақсаты - тұрақты туризм аясында ауылдық жерлердегі тарихи құрылымдарды, дәстүрлі тұрғын үй түрлерін және мәдени сипаттарды қалай бағалауға болатынын зерттеу. Сонымен қатар, осы ресурстарды сақтау және туризмге біріктіру барысында туындайтын мәселелер мен оларды шешу жолдары талқыланады. Тұрақты туризм тек экологиялық тұрақтылықты ғана емес, сонымен бірге әлеуметтік және экономикалық тұрақтылықты да мақсат ететіндіктен, бұл мақала ауылды дамыту мен туризм арасындағы қарым-қатынасты да зерттеуге бағытталған.

Түйін сөздер: тұрақтылық, туризм, ауылды дамыту, ауыл туризмі, мәдени құндылықтар.

Вклад сельского туризма в достижение целей ООН в области устойчивого развития

Ибрагим Айдын, Хакан Онал

Аннотация: Туризм является важным сектором в мире с точки зрения экономического роста, культурного взаимодействия и социального развития. Однако быстрый рост туризма может также привести к негативным последствиям, таким как ухудшение состояния окружающей среды, культурная эрозия и чрезмерное использование ресурсов. Эта ситуация подчеркнула необходимость ведения туристической деятельности устойчивым образом. Устойчивый туризм - это подход, направленный на защиту природных ресурсов, поддержку местных культур и обеспечение справедливого распределения экономических выгод [1]. Этот подход стремится обеспечить долгосрочное сбалансированное развитие туризма как в экологическом, так и в социокультурном плане. Сельские районы обладают большим потенциалом для устойчивого туризма. В этих регионах находятся уникальные ресурсы, такие как исторические сооружения, традиционные типы жилья и богатое культурное наследие. Целью данного исследования является изучение того, как исторические сооружения, традиционные типы жилья и культурные особенности в сельских районах могут быть оценены в рамках устойчивого туризма. Кроме того, будут обсуждаться проблемы и решения, возникающие в процессе сохранения и интеграции этих ресурсов в туризм. Поскольку устойчивый туризм нацелен не только на экологическую, но и на социальную и экономическую устойчивость, данное исследование также углубится в связь между развитием сельских районов и туризмом.

Ключевые слова: устойчивость, туризм, развитие сельских районов, сельский туризм, культурные ценности.

Рельеф как фактор преимуществ туристской привлекательности Щучинско-Боровской курортной зоны в целях устойчивого развития

Гульнара Ахметбекова^{*1}, Иван Плачинта², Гуляим Саматова³, Галымбек Байгукин⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; gulnara---89@mail.ru

²Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан; plachinta-ivan@mail.ru

³Школа-лицей BINOM SCHOOL имени А. Байтурсынулы, Астана, Казахстан; janim1974@mail.ru

⁴Astana International University, Астана, Казахстан; nakishbaeva@mail.ru

*Корреспонденция: gulnara---89@mail.ru

Цитирование: Ахметбекова, Г., Плачинта, И., Саматова, Г., Байгукин, Г. (2025). Рельеф как фактор преимуществ туристской привлекательности Щучинско-Боровской курортной зоны в целях устойчивого развития. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 94-110.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-94-110>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 16.01.2025
Исправлена: 28.02.2025
Принята: 11.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. Ключевым фактором привлекательности Щучинско-Боровской курортной зоны является рельеф и его основные морфометрические характеристики (горизонтальное и вертикальное расчленение, уклон поверхности и экспозиция склонов). Цель исследования – объективная оценка привлекательности территории. Описывается процесс восприятия территории местности, которое зависит от особенностей человека. Уделяется внимание эстетическому восприятию - процессу осознания и оценки красоты или гармонии в различных объектах или явлениях. Рассмотрено субъективное восприятие объектов, связанных с психологическими механизмами, которые формируют наши эмоции, предпочтения и реакции на окружающий мир. Путем анализа морфометрических показателей рельефа с учетом растительности территории, в статье была дана объективная оценка аттрактивности исследуемой зоны с использованием инструментов программы ArcGIS.10.8. Представлены основные этапы рассмотрения рельефа путем использования информационных технологий – рассмотрение вертикального и горизонтального расчленения, экспозиции и уклона рельефа. Значимость исследования состоит в разработке балльной системы оценки рельефа для определения перспективных зон развития туризма в целях устойчивого развития. Новизна исследования состоит в применении комплексного ГИС-анализ, использования балльной методики оценки привлекательности и оценки рельефа. В исследовании полученные результаты представлены как инструмент для планирования и принятия стратегических решений, направленных на развитие туристической отрасли, включая сохранение природных ландшафтов и устойчивое использование ресурсов.

Оценка морфометрических характеристик рельефа, таких как вертикальное и горизонтальное расчленение, углы наклона, экспозиция склонов, позволяет определить наиболее перспективные зоны для дальнейшего использования, например, для организации туристических маршрутов, создания инфраструктуры и экологического туризма.

Ключевые слова: рельеф, горизонтальная расчлененность, вертикальная расчлененность, уклон поверхности, экспозиция склонов, пейзажное разнообразие, оценочная карта.

1. Введение

Определение преимуществ и ведущих показателей эстетического восприятия ландшафта во многом зависит от физиологических особенностей человека. Большую часть информации пространства человек получает преимущественно посредством зрения. Вследствие этого зрительное восприятие может измениться от способностей человека воспринимать данную информацию. Кроме этого, эстетическое восприятие зависит в определенной степени и от психологического фактора. Один и тот же объект туристской зоны может восприниматься каждым наблюдателем по-разному, так как такое восприятие зависит от особенностей человека. Эстетическое восприятие - это процесс осознания и оценки красоты или гармонии в различных объектах или явлениях. Это субъективное восприятие тесно связано с психологическими механизмами, которые формируют наши эмоции, предпочтения и реакции на окружающий мир. Эстетика не существует в вакууме: она зависит от множества факторов, среди которых важное место занимает психология. Психологические факторы эстетического восприятия можно выделить следующими группами:

- Эмоции и личные переживания. Одним из ключевых факторов, влияющих на эстетическое восприятие, является эмоциональный отклик. Мы не воспринимаем красоту только через рациональные или визуальные критерии. Эмоции, которые вызывает тот или иной объект или явление, значительно влияют на нашу оценку. Например, если человек испытывает радость или умиротворение от вида природы, то ландшафт будет воспринят как более красивый. Напротив, если объект вызывает страх или тревогу, его эстетическая привлекательность может быть значительно снижена.

- В психологии существует теория, называемая теорией эмоциональной реакции, согласно которой эстетическое восприятие зависит от эмоционального фона, с которым человек воспринимает объект. Наши переживания, например, воспоминания о положительных или отрицательных событиях в прошлом, могут усиливать или уменьшать восприятие красоты.

- Когнитивные процессы и внимание. Эстетическое восприятие напрямую связано с когнитивными процессами, такими как внимание, память и восприятие. Наши способности к сосредоточению и восприимчивости к различным элементам окружающей среды могут существенно изменять то, как мы воспринимаем красоту. Например, внимание человека, направленное на определённые детали, может изменить общий взгляд на ландшафт или произведение искусства. В психологии существует концепция "избирательного внимания", когда человек фокусируется на определённых характеристиках объекта (цвете, форме, текстуре) и в результате изменяется его восприятие.

Когнитивная теория восприятия утверждает, что для эстетической оценки важно не только то, что человек видит, но и то, как он воспринимает и интерпретирует эти визуальные данные. Например, сложные и многослойные объекты, которые требуют больше внимания и анализа, могут восприниматься как более привлекательные, чем простые, однообразные формы.

- Психологический комфорт и предпочтения. Психологический комфорт играет важную роль в восприятии красоты. Теория "психологического комфорта" утверждает, что люди склонны воспринимать эстетически привлекательными те объекты, которые вызывают у них ощущение комфорта и безопасности. Это может объяснить, почему природа, в частности такие её элементы, как спокойное озеро или лес, воспринимаются как более гармоничные и красивые. Такие ландшафты ассоциируются с спокойствием и расслаблением, создавая чувство психологической гармонии.

- Теория когнитивной гармонии. С точки зрения когнитивной психологии, люди склонны искать гармонию и баланс в окружающем мире. Теория когнитивной гармонии (или когнитивной диссонансности) предполагает, что наши восприятия красоты сильно зависят от того, насколько объекты или сцены соответствуют нашим внутренним ожиданиям и восприятию порядка. Когда объект воспринимается как гармоничный и сбалансированный, например, красивые пропорции или симметрия, это вызывает положительные эмоции. Несоответствие ожиданиям, наоборот, может вызвать неприятные ощущения и даже отвращение.

- Память и опыт. Психологический фактор восприятия красоты также включает память и личный опыт человека. Каждый человек на протяжении жизни накапливает свой опыт взаимодействия с окружающим миром, который влияет на то, как он воспринимает различные объекты и события. Например, человек, который в детстве часто отдыхал в горах, может воспринимать горные пейзажи как источники спокойствия и вдохновения, в то время как человек, который не имеет такого опыта, может найти их страшными или недоступными. Память о прошлом играет ключевую роль в формировании предпочтений, и она может как усиливать, так и ослаблять восприятие эстетики.

Феномен пространственного восприятия территории связан с аттрактивностью и привлекательностью ландшафтов – при этом выделяют наиболее и менее привлекательные виды ландшафта. Главная цель данной статьи - определить объективные причины, вызывающие различия между более и менее привлекательными видами рельефа и соответственно ландшафта. Психологические исследования показывают, что восприятие красоты и эстетическое удовлетворение — это результат сложного взаимодействия когнитивных, эмоциональных и социальных факторов. Например, эксперименты, проводимые в области психологии восприятия, показывают, что визуальная симметрия и пропорции играют важную роль в том, как мы оцениваем объекты как красивые. Однако это восприятие изменяется в зависимости от внутреннего состояния человека, его ожиданий и даже настроения в момент восприятия. Например, исследования в области нейропсихологии показали, что восприятие красоты связано с активацией определенных участков мозга, таких как орбитофронтальная кора, которая отвечает за эмоциональные реакции.

Рельеф Щучинско-Боровской курортной зоны играет ключевую роль в развитии туризма и определяет её привлекательность для отдыхающих. Для того, чтобы конкретизировать преимущества данного фактора курортной зоны, рассмотрим показатели привлекательности рельефа на основе теории Адама Смита (Смит, 1962).

Теория абсолютных и относительных преимуществ Адама Смита служит основой для понимания экономической эффективности и специализации в различных секторах. В контексте Щучинско-Боровской курортной зоны можно выделить уникальные преимущества, которые делают эту территорию привлекательной для туристов.

Согласно теории Адама Смита, абсолютные преимущества - это способность страны или региона производить больше товара или услуги с тем же количеством ресурсов, чем другие. Относительные преимущества - способность производить определённый товар или услугу с меньшими затратами по сравнению с другими товарами.

Данную теорию также можно применить к туристской сфере. Абсолютными преимуществами в рельефе ЩБКЗ являются:

- вертикальное расчленение: причина образования различных микроклиматов, что позволяет развивать агротуризм и лечебные процедуры, регионы с ярко выраженным вертикальным расчленением предлагают уникальные туристические маршруты, экологические экскурсии и другие программы, которые выделяют их среди конкурентов;

- степень вертикального и горизонтального расчленения: создает разнообразие природных ландшафтов и биотопов, что привлекает туристов, интересующихся природой и экотуризмом;

- высота гор и панорамные виды гор: способствуют образованию эстетического пейзажа, что привлекает туристов;

- экспозиция склонов и их освещение: создает комфортные условия для отдыха в любое время года и способствует развитию сельского хозяйства;

- доступность для активного отдыха: высота и характер склонов создают идеальные условия для горнолыжного спорта, что делает регион привлекательным для определённых категорий туристов;

Относительными преимуществами являются:

- уклон горы благоприятно сказывается на биоразнообразии и формирует уникальные условия для отдыха;

- разнообразие местности и сочетание увалисто-мелкосопочной поверхности рельефа предлагает возможность для активного отдыха людей (регионы с оптимальным уклоном предлагают туристам лыжный и пеший туризм, лечебные процедуры на основе природных ресурсов, собирательный туризм);

- развивающаяся туристическая инфраструктура, расположенная среди гор и живописных озер (гостиницы, рестораны, развлекательные заведения) создают дополнительные удобства для отдыхающих;

- доступность: наличие удобных транспортных путей и близость к крупным городам позволяют легко добраться до курорта, что увеличивает его конкурентоспособность;

- стоимость услуг: цены на услуги в курортной зоне ниже, чем в других популярных курортах, что делает их доступными для более широкой аудитории.

Рельеф Щучинско-Боровской курортной зоны предлагает, как абсолютные, так и относительные преимущества, которые могут быть использованы для привлечения туристов и развития курортного бизнеса.

В данной статье детально рассматривается абсолютный показатель – рельеф ЩБКЗ и его абсолютные преимущества (вертикальное и горизонтальное расчленение, высота и уклон гор). Рельеф выступает в качестве каркаса, влияющего на психолого-эстетическое состояние человека и формирующего аттрактивность территории (Лось, 2017). Показатели абсолютных преимуществ являются одним из важных факторов, который определяет выбор места для отдыха и рекреации туристами и предоставляют возможность для эстетического восприятия природы и ее гармоничного слияния с рекреационными активностями (Бредихин, 2010).

2. Материалы и методы

Изучение привлекательности и эстетичности ландшафтов в географии является одной из важных областей, которая исследует, как различные природные компоненты, включая рельеф, влияют на восприятие окружающей среды человеком. Это направление в географической науке стало развиваться как ответ на растущий интерес к взаимодействию человека с природой, особенно в контексте рекреации, туризма и защиты окружающей среды. Этапы изучения аттрактивности рельефа и эстетичности ландшафтов представляют собой подходы, основанные на развитии географической науки.

- Ранние исследования и философские подходы (конец XIX - начало XX века). В начале XX века интерес к эстетике природы был в основном философским. Исследования в этот период фокусировались на субъективном восприятии природных объектов. Это

время связано с развитием философии романтизма, когда внимание уделялось эмоциональному восприятию природы и стремлению людей к гармонии с ней. Известные мыслители того времени, такие как Шмидт, В., Гиббон, Э., обращались к изучению воздействия природных ландшафтов на человека, однако их работы не имели научной строгости и были больше направлены на субъективные ощущения.

- Этап систематизации и начала картографирования эстетики (середина XX века). В середине XX века географы и природоведческие науки начали систематизировать восприятие природных объектов, переходя от субъективных рассуждений к более объективным методам. В это время развиваются первые методы оценки эстетической ценности ландшафтов, включая использование карт, на которых отмечались ландшафтные элементы с высокой визуальной привлекательностью. Работы французского географа Гетта, Ж. и немецкого исследователя Меллера, Г.-Ф. положили начало анализу ландшафтов с точки зрения их эстетической ценности.

- Интеграция эстетических и экологических исследований (вторая половина XX века - начало XXI века). С развитием экологического подхода к ландшафтам, в исследование привлекательности рельефа и эстетичности включаются такие факторы, как экосистемные услуги, устойчивость природы и её способность поддерживать биологическое разнообразие. Ландшафты начали оцениваться не только с точки зрения визуальной привлекательности, но и через призму их функциональной ценности для экологии и общества. В этот период ученые начали рассматривать ландшафт как многогранную систему, в которой визуальные и экологические качества переплетаются.

- Современные исследования и мультидисциплинарный подход (XXI век). В настоящее время исследование эстетики ландшафтов стало междисциплинарной областью, где сочетаются элементы географии, экологии, психологии, социологии и даже искусствоведения. Современные подходы ориентированы на комплексное изучение восприятия рельефа и ландшафтов в разных культурных и социальных контекстах. Используются как количественные, так и качественные методы исследования, включая анализ фотографий, проведение социологических опросов, использование GIS-технологий (географические информационные системы) для оценки эстетической ценности и популярности различных природных ландшафтов.

- Объективным подходом в восприятии ландшафта является функциональный подход. В этом подходе рассматриваются не только визуальные характеристики ландшафта, но и его функциональная роль в жизни человека. Оценка ландшафта с точки зрения его способности поддерживать экологическое равновесие, улучшать качество жизни или быть полезным для рекреации и туризма стала важным направлением в исследовании ландшафтов. Важно учитывать устойчивость экосистем и их роль в поддержании биологических процессов.

- Эстетический анализ ландшафта Оценка эстетической привлекательности ландшафта требует более детализированного подхода, включая использование различных критериев, таких как симметрия, гармония, текстуры и контрасты, а также особенности восприятия человеком природных форм. Существует несколько теорий, которые объясняют, что делает ландшафт привлекательным. Одной из них является теория "естественной красоты", в которой утверждается, что природные ландшафты, такие как горы, водоемы и леса, воспринимаются как более эстетически привлекательные из-за своей природной органичности.

- Психологические и культурные аспекты Восприятие рельефа и ландшафта также зависит от культурных и психологических факторов. Например, для одного человека величественные горы могут быть источником вдохновения и спокойствия, тогда как для другого это может быть символом опасности или трудности. Важно учитывать, что разные культуры могут придавать разные значения одним и тем же природным элементам. Психологические исследования показывают, что людям часто нравятся ландшафты,

которые дают ощущение безопасности и контроля, а также те, которые ассоциируются с позитивным опытом (например, походы, отдых на природе).

- Географические информационные системы (GIS). В последние десятилетия для анализа ландшафтной эстетики все активнее применяются географические информационные системы. GIS позволяют исследовать пространственные данные, такие как топографические карты, изображения, а также проводить анализ в реальном времени. С помощью этих систем можно моделировать и оценивать ландшафты на основе различных критериев: от визуальных характеристик до экологической устойчивости. Такой подход дает возможность обрабатывать большие объемы данных и выявлять предпочтения различных групп населения по отношению к определенным природным зонам.

Научная основа эстетического направления и восприятия ландшафта в науке была заложена в начале XX века в работах Гумбольдта, А., Геттнера, А., Семенова-Тян-Шанского, В.П. Термин «эстетическая география» ввел Геттнер, А., который «взвешивает эстетическую ценность и красоту» разнообразных ландшафтов и территорий (Геттнер, 1930).

В XX веке в англоязычных странах Запада и США формируется отдельное направление - поведенческая география. По мнению Голда, Дж., «...огромное внимание в поведенческой географии уделяется изучению представлений о пространстве, исследованию его образа в сознании» (Егембердиева, 2021). Подобными исследованиями занимались Лоуэнталь, Д. (1961, 1967), Кирк, У. (1963), Пеннинг-Роуселл, Э. (1973, 1974), Харди, Д. (1973) и др. Было установлено, что теме восприятия ландшафта посвящены работы Мейнига, Д. (1979), Фута, К. (1979), Косгроува, Д. (1984), Релпа, Э. (1987), Гибсона, Дж. (1988) и др.

Помимо аттрактивности в ландшафтной географии вводится понятие перцепции ландшафта, по сути близкое к понятию «эстетическое восприятие» (Лозбенева, 2022). В первую очередь в процессе оценки эстетических качеств ландшафта важно учитывать его аттрактивность - привлекательность (Кириллова, 2017). Наблюдатель всегда может выделить объективный фон и фигуры, их очертания (Шеремет, 2014).

Подходы к объективной оценке восприятия ландшафта развиваются и среди зарубежных исследователей (Daubert, J., Young, R. (1981), Brown, T. (1991), Simonic, T. (2003), Fourie, R. (2005), Kosmopoulos, P. (2005), Wu, Y. (2006), Carlson, A. (2008), Roth, M., Gruehn, D. (2012), Aoki, Y. (2013, 2014) и др.). С каждым годом внедряются более усовершенствованные технологии для изучения эстетических свойств территорий и рекреационного планирования. Существенно увеличивается точность исследований при использовании пространственных данных сверхвысокого разрешения, которые могут быть получены путем аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов. В этом направлении ведут исследования – Hackney, C., Clayton, A. (2015), Cwiakala, P., Kocierz, R. и др. (2017), Shaoyu, L., Weijie, D. и др. (2018), Murtha, T., Broadbent, E., Golden, C. (2019), Shiou, Y., Chengju, D. и др. (2020). В работе Cwiakala, P. и др. (Cwiakala et al., 2014) оценивается безопасность туристических маршрутов в горных районах.

Оценка привлекательности форм рельефа требует применения различных методов, учитывающих экспозицию склонов, вертикальную и горизонтальную расчлененность рельефа, а также высоту:

- геодезические измерения и полевые исследования: использование топографических карт позволяет определить направление склонов и их уклон, исследование в полевых условиях позволяет наглядно рассмотреть аттрактивность рельефа, однако данный метод охватывает ограниченную территорию.

- ГИС-технологии: применение геоинформационных систем (ГИС) для анализа пространственных данных позволяет точно оценить морфологическую структуру рельефа.

Исследование пейзажного разнообразия широко проводится с использованием ГИС технологий (Frank et al., 2013; Kolesnikov, 2007; Vibaeva et al., 2018). При оценке эстетических качеств территории широко применяются балльный и экспертный подходы (Roth et al., 2012; Vargues et al., 2008). Синтез современных методов исследования аттрактивности позволяет обработать большой объем картографических данных с использованием полевых наблюдений (Dirin et al., 2010; Eringis et al., 1975).

Основными морфометрическими показателями выбраны критерии согласно методике Анисимова, В.И. (1999) (таблица 1). Основными показателями в данной методике выбраны следующие показатели: вертикальное и горизонтальное расчленение, экспозиция и уклон рельефа (таблица 1).

Таблица 1. Таблица балльной оценки привлекательности рельефа (Анисимов, 1999)

Таблица балльной оценки привлекательности рельефа							
Вертикальное расчленение		Горизонтальное расчленение		Экспозиция склонов		Уклоны	
м	баллы	Км/км ²	баллы	экспозиция	баллы	градусы	баллы
0-25	1	0-0,6	1	С	3	0-1	1
25-50	2	0,6-1,2	2	С-В	4	1-3	2
50-75	3	1,2-1,8	3	В	5	3-5	3
75-100	4	1,8-2,4	4	С-З	6	5-7	4
100-125	5	2,4-3,0	5	З	7	7-10	5
125-150	6	3,0-3,6	6	Ю-В	8	10-15	6
150-175	7	3,6-4,2	7	Ю-З	9	15-20	7
175-200	8	4,2-4,8	8	Ю	10	20-25	8
200-225	9	4,8-5,4	9			25-30	9
Более 225	10	Более 5,4	10			Более 30	10

Используя ГИС технологии была получена цифровая модель рельефа исследуемой зоны, топографическая и геоморфологическая карты. Территория была разделена на исследуемые квадраты размером 300 м*300 м (рисунок 1). На первом этапе проводился сбор исходных данных, включая аэрофотоснимки, спутниковые изображения и данные с геодезических приборов. Эти данные использовались для формирования основы для дальнейшего анализа. Для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались методы интерполяции и 3D-моделирования. На основе исходных данных о высотах и рельефных характеристиках местности была построена модель, которая позволяет точно отображать топографические особенности исследуемой территории. На основе ЦМР была построена топографическая карта, включающая контуры рельефа, ключевые географические объекты и сети дорог. Для составления геоморфологической карты использовалась информация о типах рельефных форм, их возрастных характеристиках и происхождении. В качестве следующего шага была выполнена детализация исследуемой территории с разделением на квадраты размером 300 м*300 м. Это разделение необходимо для проведения более точного анализа геоморфологических и топографических особенностей на микроуровне. Каждый квадрат стал единицей анализа для последующих геопространственных исследований.

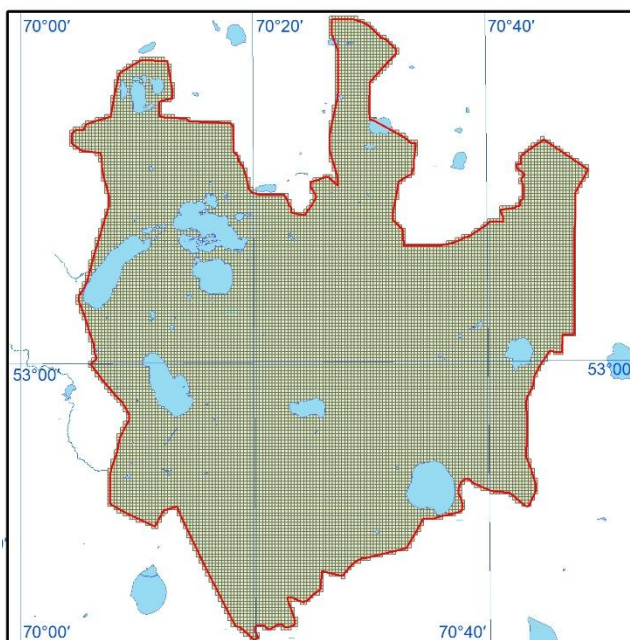


Рисунок 1. Квадраты изучения ЩБКЗ

Все расчеты четырех показателей согласно методике Анисимова В.И. проведены с использованием инструментов ArcGIS 10.8 – Spatial Analyst. Полученные четыре показателя путем суммирования баллов аттрактивности по каждому морфометрическому показателю были суммированы согласно формуле 1 (Sheremet et al., 2020):

$$S = V + G + C + A, \quad (1)$$

где S – сумма морфометрических показателей; V – вертикальное расчленение; G – горизонтальное расчленение; C – углы наклона; A – экспозиция склонов. В результате суммирования баллов морфометрических показателей получена итоговая оценочная карта привлекательности ЩБКЗ.

3. Результаты

Регион исследования согласно природному физико-географическому районированию, входит в состав Кокчетавской степной, лесостепной возвышенной, увалисто-мелкосопочной провинции. Название провинции соответствует одноименной возвышенности, входящей в состав Центрального Казахстана. Средние высоты возвышенности колеблются в пределах 250-450 м над уровнем моря. Осложняющие ее островные массивы низкогорий и мелкосопочника достигают 600-800 м. Наиболее значительный из них – горы Кокшетау (до 947 м) и Щучинские сопки (рисунок 2).



Рисунок 2. Физическая карта ШЧБКЗ

Вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа определялось с помощью инструмента зональной статистики (Zonal Statistics), в котором в пределах выделенных квадратов вычислялась разница между наименьшим и наибольшим значениями всех ячеек раstra, которые принадлежат выходная ячейка (RANGE). Инструмент Zonal Statistics вычисляет разницу между максимальным и минимальным значениями всех ячеек растрового слоя в пределах каждой зоны. Результатом является новый растровый слой, где для каждой зоны отображается разница между наибольшим и наименьшим значением. Это позволяет получить информацию о вертикальной изменчивости рельефа в каждой из выделенных зон (300 м*300 м). Результатом работы инструмента Zonal Statistics стал новый растровый слой, который можно визуализировать для анализа вертикальных характеристик рельефа. Горизонтальное расчленение получило значение 2 баллов (52,2%) и 3 балов (31,5%). Результат расчета вертикальной расчлененности практически всей территории ШЧБКЗ имел наименьший балл. Наибольшее значение и наивысшую оценку получило гривисто-холмистое низкогорье Кокшетауской возвышенности – горы Кокше, Бура, Жеке Батыр, гора Лысяя (рисунок 3).

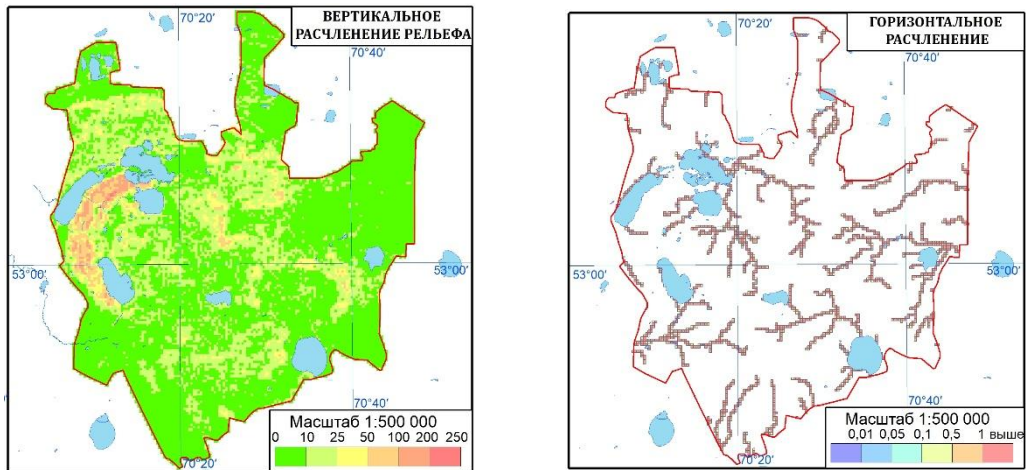


Рисунок 3. Вертикальная и горизонтальная расчлененность ЩБКЗ

Примечание: составлено автором с использованием программы ArcGIS.10.8

Экспозиция определялась с помощью инструмента экспозиция (Aspect) группы инструментов Surface (Banister D., 2012). Для данного этапа использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) в формате растра. Результат работы инструмента вычисления экспозиции склона Aspect — это новый растровый слой, в котором каждому пикселю присвоено значение, которое представляет угол экспозиции для соответствующего склона. Экспозиция определяет направление уклона максимальной скорости изменения значений от каждой ячейки до соседних с ней ячеек. На карте экспозиции склонов ЩБКЗ наименьший балл получила плоская поверхность, наибольший — склоны юго-запада и юго-востока (рисунок 4).

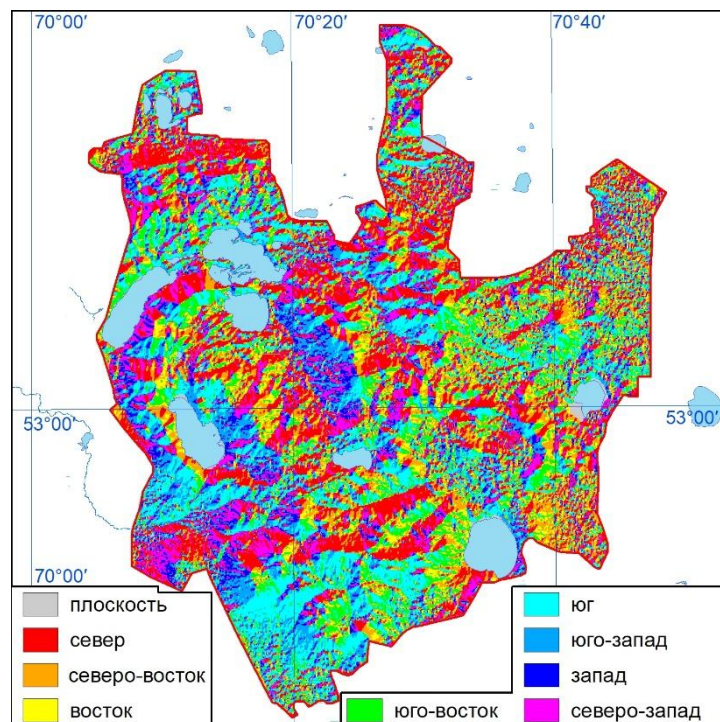


Рисунок 4. Экспозиция склонов ЩБКЗ

Уклон поверхности исследуемой зоны рассчитывался инструментом уклон (Slope) группы инструментов Surface (рисунок 5). Для расчета уклона была использована цифровую модель рельефа ЦБКЗ, которая представляла собой растровое изображение с высотными значениями на каждой ячейке. Этот растровый слой использовался в качестве входных данных для инструмента Slope – ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Surface. Инструмент Slope рассчитывает уклон для каждой ячейки на основе изменения высот между соседними ячейками. Он использует следующие шаги - определение для каждой ячейки растрового слоя уклона по отношению к соседним ячейкам (Battakova et al., 2022) Результат расчета уклона сгруппирован по 3° уклона поверхности, где наибольший уклон присвоен Кокшетауской возвышенности.

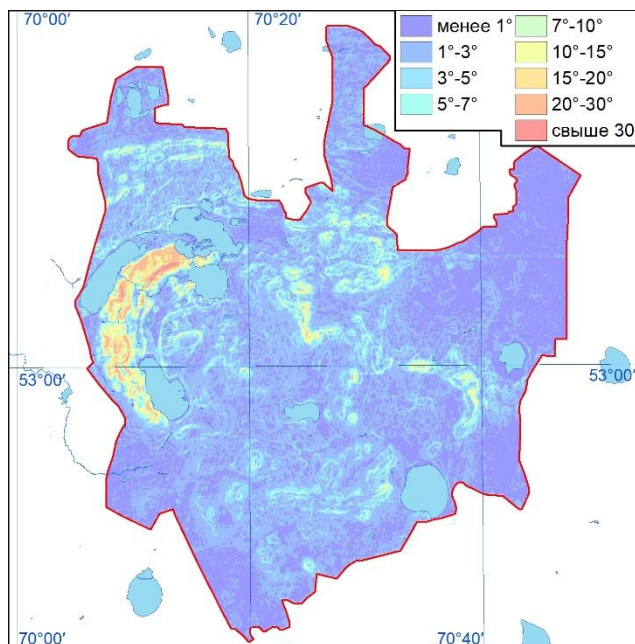


Рисунок 5. Карта уклона ЦБКЗ

Для вычисления среднего значения суммы полученных морфометрических характеристик рельефа с использованием алгебры карт (Map Algebra) в ArcGIS 10.8, выполнено несколько последовательных шагов. Алгебра карт позволяет выполнять операции над растровыми данными, применяя математические и статистические операции к пикселям растровых слоев. Для расчета морфометрических характеристик рельефа нам потребовались растровые данные, которые представляли собой цифровую модель рельефа (ЦМР), а также полученные путем расчета слои (вертикальное и горизонтальное расчленение, экспозиция склона, уклон). Данная функция позволяет использовать математические операции на растровых слоях для получения комбинированных характеристик. Однако, для оценки пейзажного разнообразия нами рассмотрена растительность территории, так как этот фактор увеличивает привлекательность территории (рисунок 6).

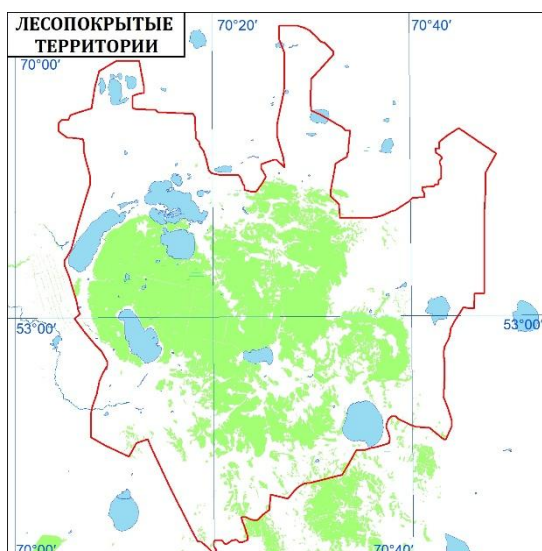


Рисунок 6. Лесопокрытие ЩБКЗ

Созданные морфометрические карты исследуемой территории и выбранная методика Анисимова В.И. позволяет нам создать оценочную карту привлекательности рельефа (рисунок 7). с пятью показателями аттрактивности – неблагоприятная (0-2 балла), малоблагоприятная (2-4 балла), умеренно благоприятная (4-6 баллов), относительно благоприятная (6-8 баллов) и благоприятная (8-10 баллов).

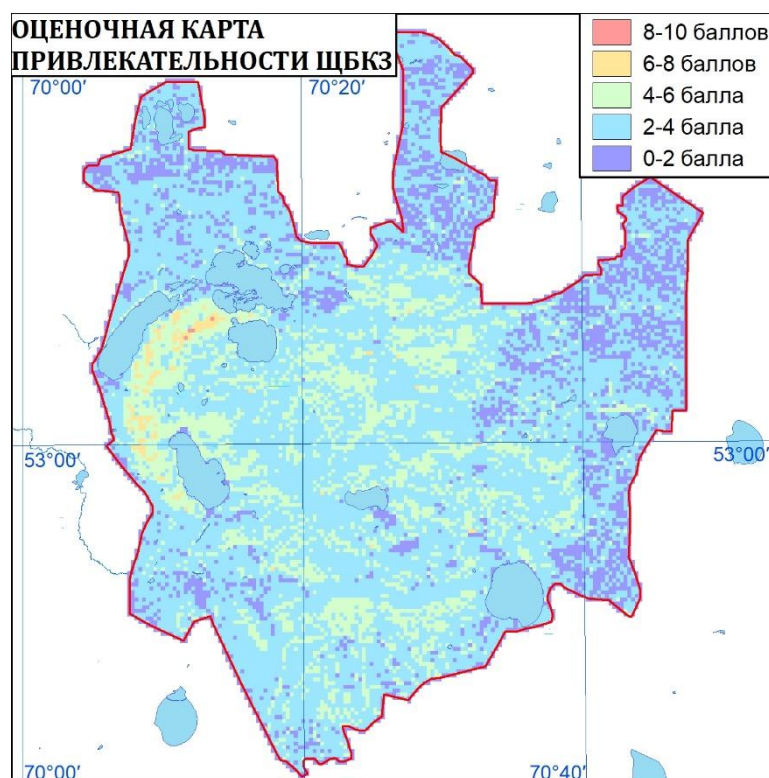


Рисунок 7. Оценочная карта привлекательности ЩБКЗ

4. Обсуждение

Полученные данные и расчеты с использованием программы ArcGIS.10.8, аттрактивными ландшафтами являются г. Кокше, г. Жеке Батыр и высокие отметки Щучинской сопки, где вертикальное расчленение изменяется от 100 до 200 м с юго-восточной, южной и юго-западной экспозицией склонов. Исходя из этих показателей, эта территория имеет перспективу развития спортивного туризма (горнолыжный спорт, альпинизм). Пешеходный туризм имеет возможность развиваться на всей территории ЩБКЗ. Территория Кокшетауской возвышенности благоприятна для оздоровительных целей. Наиболее привлекательной с учетом всех четырех морфометрических характеристик и лесопокрывности территории является Поляна Абылай хана. Остальная территория с баллом привлекательности от 4 до 6 является умеренно благоприятной. Эти территории имеют потенциал для развития прогулочно-оздоровительного вида туризма, в том числе сбора ягод и грибов. Около 60% территории ЩБКЗ являются менее аттрактивными и неблагоприятными (территория города Щучинск). На этой территории все морфометрические характеристики имеют минимальные значения.

Так как смена сезонов года ярко выражена на исследуемой территории, этот фактор оказывает значительное влияние на туристическую привлекательность Щучинско-Боровской курортной зоны, создавая как возможности, так и вызовы для развития туризма. Зимний сезон, с его характерными условиями, может оказывать двойное воздействие на доступность и безопасность туристических маршрутов (Dmitriyev et al., 2022; Evloeva et al., 2020; Gómez et al., 2023, Chirikov, 2008, Dianin et al., 2024). Низкие температуры, снегопады и ледяные покровы ограничивают доступность некоторых туристических объектов и маршрутов, особенно в горных и труднодоступных районах. Это требует особого внимания к подготовке инфраструктуры, включая зимнюю уборку, поддержание проезжих путей и обеспечение безопасности туристов.

С другой стороны, зимние условия также открывают новые возможности для активного зимнего туризма, включая катание на лыжах, сноубордах, зимние походы и другие виды спорта. Это привлекает дополнительный поток туристов, заинтересованных в зимних курортах. Однако, для обеспечения привлекательности и безопасности таких видов отдыха необходимо совершенствование инфраструктуры, наличие квалифицированного персонала и соответствующие меры по защите от рисков, связанных с холодом и опасными погодными условиями.

Летний сезон, наоборот, характеризуется благоприятными условиями для туризма, включая пешие походы, велосипедные маршруты и водные виды спорта. Высокие температуры и наличие растительности создают комфортные условия для отдыха, однако в этот период также возникает необходимость в обеспечении доступа к питьевой воде, тени и защиты от солнечных ожогов.

5. Заключение

Результаты исследования могут быть применены для разработки стратегии устойчивого туризма и регионального планирования развития Щучинско-Боровской курортной зоны. Результаты данного исследования, основанные на комплексном ГИС-анализе и балльной методике оценки привлекательности, могут быть полезны как органам управления туризмом, так и инвесторам в сфере развития туризма. Оценка морфометрических характеристик рельефа, таких как вертикальное и горизонтальное расчленение, углы наклона, экспозиция склонов, позволяет определить наиболее перспективные зоны для дальнейшего использования, например, для организации туристических маршрутов, создания инфраструктуры и экологического туризма.

Для органов управления туризмом итоговая оценочная карта привлекательности ЩБКЗ представляет собой ценный инструмент для планирования и принятия

стратегических решений, направленных на развитие туристической отрасли, включая сохранение природных ландшафтов и устойчивое использование ресурсов.

Инвесторы могут использовать полученные результаты для оценки рисков и выгод при выборе площадок для инвестиционных проектов, таких как строительство гостиниц, курортных комплексов или туристических объектов. Карта привлекательности позволяет выделить зоны с наибольшим потенциалом для успешной реализации таких проектов, а также оптимизировать процессы планирования и ресурсного обеспечения.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклад авторов

Концептуализация, методология, исследование, руководство – Г.А.; программное обеспечение, валидация, рецензирование и редактирование – И.П.; написание – подготовка оригинального черновика, формальный анализ – Г.С., Г.Б. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Ахметбекова Гульнара Сагынтаевна – докторант 2 курса образовательной программы 8D05213, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; gulnara--89@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3067-0040>

Плачинта Иван Георгиевич – магистр естествознания, Кокшетауский университет им. Ш.Уалиханова, ул.Абая 76, Кокшетау, Казахстан, 020000; plachinta-ivan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5735-1288>

Саматова Гуляим Нурбергеновна – преподаватель географии, Школа-лицей BINOM SCHOOL имени А. Байтурсынулы, ул. А.Байтурсынова 25, Астана, Казахстан, 010000; janim1974@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9347-5799>

Байгукин Галымбек Турсынулы – старший преподаватель, университет «Astana International University», ул. С.Шаймерденова 8Б, Астана, Казахстан, 010000; nakishbaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7464-5532>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования

10. Благодарности: признательная благодарность за техническую поддержку в работе статьи Плачинта И.Г.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Abubakirova, A., Syzdykova, A., Kelesbayev, D., Dandayeva, B., & Ermankulova, R. (2016). Place of tourism in the economy of Kazakhstan Republic. *Procedia Economics and Finance*, 39, 3–6. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(16\)30232-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30232-5)
2. Anisimov, V. I. (1999). Morfometricheskii analiz relyefa [Morphometric analysis of relief]. Sochi: Sochinskiy Gosudarstvennyy Universitet Turizma i Kurortnogo Dela [Sochi State University of Tourism and Resort Management], 98-104.
3. Atasoy, E., Atiş, E., Kanagatov, Z., Izenbaev, B., Kabiyevev, Y. S., & Seraliyev, A. (2022). Characteristics and tourism potential of the Burabay National Park (Kazakhstan). *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 43(3), 1129–1137. <https://doi.org/10.30892/gtg.43334-928>
4. Banister, D. (2012). Transport and economic development: Reviewing the evidence. *Transport Reviews*, 32(1), 1–2. <http://hdl.handle.net/10.1080/01441647.2011.603283>

5. Battakova, K., & Saipov, A. (2022). Healthcare and wellness tourism for people with occupational diseases in Central Kazakhstan. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 45(4spl), 1586–1593. <https://doi.org/10.30892/gtg.454spl07-978>
6. Bibaeva, A. Yu., & Makarov, A. A. (2018). The use of GIS for calculating complex indicators of aesthetic assessment of landscapes. *Bulletin of the Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*, 24, 17–33.
7. Bredikhin, A. V. (2010). *Rekreatsionno-geomorfologicheskie sistemy* [Recreational-geomorphological systems]. Smolensk: Oykumena, 55-61.
8. Chirikov, A. I., Pozdnyak, G. V., & Kamenskaya, I. Y. (2008). *Atlas Mira* [World Atlas]. Izdatelstvo Oniks, 112-114.
9. Cwiakala, P., & Kocierz, R. (2017). Assessment of the possibility of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for the documentation of hiking trails in Alpine areas. *Sensors*, 18(1), 1–28. <https://doi.org/10.3390/s18010081>
10. Dianin, A., Gidam, M., & Hauger, G. (2024). Measuring public transport accessibility to fixed activities and discretionary opportunities: A space–time approach. *European Transport Research Review*, 16, 9. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00636-2>
11. Dirin, D., & Popov, E. (2010). Assessment of landscape and aesthetic attractiveness of landscapes: A methodological review. *Proceedings of the Altai State University*, 3, 120–124.
12. Dmitriyev, P. S., Fomin, I. A., Nazarova, T. V., & Wendt, J. A. (2021). Transport accessibility of the lake ecosystems in the North Kazakhstan region as a factor of tourism development. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 35(2), 289–296. <https://doi.org/10.30892/gtg.35204-650>
13. Eringis, K. I., & Budryunas, A. (1975). The essence and methods of detailed ecological and aesthetic research of landscapes. In *Ecology and Aesthetics of Landscape* (pp. 107–160). Vilnius.
14. Evloeva, A. S., & Titova, M. A. (2020). Prospects for the development of tourist animation in the territory of the Shchuchinsky Borovsky Resort Zone of the Akmola Region. *Magyar Tudományos Journal*, 40, 10–13.
15. Frank, S., Fürst, C., Koschke, L., Witt, A., & Makeschin, F. (2013). Assessment of landscape aesthetics – Validation of a landscape metrics-based assessment by visual estimation of the scenic beauty. *Ecological Indicators*, 32, 222–231.
16. Gettner, A. (1930). *Geografiya. Eye istoriya, sushchnost' i metody* [Geography. Its History, Essence, and Methods]. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe Izdatelstvo [State Publishing House], 25-28.
17. Gómez, J. M., Moncada, C. A., & Escobar, D. A. (2023). Spatial equity analysis of educational service: Methodological proposal based on a transport supply model. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 51(4spl), 1622–1628. <https://doi.org/10.30892/gtg.514spl03-1158>
18. Kirillova, A. V. (2012). Relyef kak faktor esteticheskoy privlekatelnosti landshafta [Relief as a factor of aesthetic attractiveness of the landscape]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, 2, 104–108.
19. Kolesnikov, D. A. (2007). Review of existing methods for assessing recreational areas. *GeoSiberia: International Exhibition and Scientific Congress*, 6, 206–209.
20. Los, M. A. (2017). Otsenka relyefa Tyumensko-Tobol'skogo turistiko-rekreatsionnogo karkasa v tselyakh razvitiya turizma [Assessment of the relief of the Tyumen-Tobolsk tourist-recreational framework for tourism development]. *Geograficheskiy Vestnik*, 4(43), 161–169.
21. Lozbenava, E. A. (2022). Metodicheskie podkhody k otsenke esteticheskikh svoystv landshaftov [Methodological approaches to assessing the aesthetic properties of landscapes]. *Vestnik Rossiyskogo Universiteta Druzhy Narodov. Seriya: Ekologiya i*

- Bezopasnost Zhiznedeyatelnosti*, 30(2), 116–126. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-2-116-126>
22. Roth, M., & Gruehn, D. (2012). Visual landscape assessment for large areas – Using GIS, internet surveys, and statistical methodologies in participatory landscape planning for the federal state of Mecklenburg-Western Pomerania, Germany. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section A: Human and Social Sciences*, 129–142.
 23. Sheremet, E. A., Dekhnich, V. S., & Kalutskova, N. N. (2020). Perspectives of GIS-technology application for visual evaluation of landscapes for organization of geopark. *Bulletin of the Russian Geographical Society*, 152(2), 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869607120060063>
 24. Sheremet, E. A., Kalutskova, N. N., & Dekhnich, V. S. (2021). Vizualnye svoystva landshaftov i metody ikh otsenki s primeneniem GIS (na primere Belogradchishskikh skal, Bolgariya) [Visual properties of landscapes and methods of their evaluation using GIS (a case study of the Belogradchik Rocks, Bulgaria)]. *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe Obespechenie Ustoychivogo Razvitiya Territoriy*, 27(2), 191–204. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-191-204>
 25. Smith, A. (1962). *Issledovanie o prirode i prichinakh bogatstva narodov* [An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations] Moscow, 110-113.
 26. Vargues, P., & Loures, L. (2008). Using geographic information systems in visual and aesthetic analysis: The case study of a golf course in Algarve. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4(9), 774–783.
 27. Yegemberdiyeva, K. B. (2021). Otsenka turistichestkogo potentsiala relyefa v tselyakh ustoychivogo razvitiya turizma na primere Shchuchinsko-Borovskoy kurortnoy zony [Assessment of tourism potential of relief for sustainable tourism development in the Shchuchinsko-Borovskaya resort zone]. *Geografiya i Vodnye Resursy*, 3, Almaty, 52-55.

Рельеф - Щучье-Боровое курорттық аймағының тұрақты дамуындағы туристік тартымдылық артықшылықтарының факторы

Гульнара Ахметбекова, Иван Плачинта, Гуляим Саматова, Галымбек Байгукин

Андатпа. Щучье-Боровое курорттық аймағының тартымдылығының шешуші факторы рельеф және оның негізгі морфометриялық сипаттамалары (көлденең және тік кесу, беткі еңіс және еңіс экспозициясы) болып табылады. Зерттеудің мақсаты – аумақтың тартымдылығын объективті бағалау. Адамның ерекшеліктеріне байланысты аумақтың аумағын қабылдау процесі сипатталады. Эстетикалық қабылдауға - әртүрлі заттардағы немесе құбылыстардағы сұлулықты немесе үйлесімділікті сезіну және бағалау процесіне көңіл бөлінеді. Біздің эмоцияларымызды, қалауларымызды және қоршаған әлемге реакцияларымызды қалыптастыратын психологиялық механизмдермен байланысты объектілерді субъективті қабылдау қарастырылады. Аумақтың өсімдік жамылғысын ескере отырып рельефтің морфометриялық көрсеткіштерін талдау арқылы мақалада ArcGIS.10.8 бағдарламасының құралдары арқылы зерттелетін аумақтың тартымдылығына объективті баға берілді. Ақпараттық технологияларды қолдану арқылы рельефті зерттеудің негізгі кезеңдері – рельефтің тік және көлденең кесілуін, экспозициясы мен еңісін зерттеу берілген. Зерттеудің маңыздылығы тұрақты даму мақсатында туризмді дамытудың перспективалық бағыттарын анықтау үшін рельефті бағалаудың баллдық жүйесін әзірлеуде жатыр. Зерттеудің жаңалығы кешенді ГАЖ талдауын қолданудан, тартымдылықты бағалау және рельефті бағалау үшін баллдық әдісті қолданудан тұрады. Зерттеуде табиғи ландшафттарды сақтау және ресурстарды тұрақты пайдалануды қоса алғанда, туризм индустриясын дамытуға бағытталған стратегиялық шешімдерді

жоспарлау және қабылдау құралы ретінде алынған нәтижелер ұсынылған. Рельефтің морфометриялық сипаттамаларын бағалау, мысалы, тік және көлденең кесу, еңіс бұрыштарын және еңіс экспозициясын одан әрі пайдалану үшін, мысалы, туристік маршруттарды ұйымдастыру, инфрақұрылымды құру және экотуризм үшін ең перспективалы аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: рельеф, көлденең кесу, тік кесу, жер бетіндегі еңіс, еңіс экспозициясы, ландшафттың әртүрлілігі, бағалау картасы.

Relief as a factor of advantages of tourist attractiveness of the Shchuchinsk-Borovskoy resort zone for the purposes of sustainable development

Gulnara Akhmetbekova, Ivan Plachinta, Gulyaim Samatova, Galymbek Baigukin

Abstract. The key factor in the attractiveness of the Shchuchinsk-Borovskaya resort area is the relief and its main morphometric characteristics (horizontal and vertical dissection, surface slope and slope exposure). The purpose of the study is to objectively assess the attractiveness of the territory. The process of perception of the area, which depends on human characteristics, is described. Attention is paid to aesthetic perception - the process of awareness and evaluation of beauty or harmony in various objects or phenomena. The subjective perception of objects is considered in connection with psychological mechanisms that shape our emotions, preferences and reactions to the world around us. By analyzing the morphometric indicators of the relief, taking into account the vegetation of the territory, the article provides an objective assessment of the attractiveness of the study area using the tools of the ArcGIS.10.8 program. The main stages of consideration of the relief using information technology are presented - consideration of vertical and horizontal dissection, exposure and slope of the relief. The significance of the study is in the development of a point system for assessing the relief to determine promising areas for tourism development for the purposes of sustainable development. The novelty of the study lies in the application of complex GIS analysis, the use of a scoring method for assessing attractiveness and assessing the relief. The results obtained in the study are presented as a tool for planning and making strategic decisions aimed at developing the tourism industry, including the preservation of natural landscapes and sustainable use of resources. Evaluation of the morphometric characteristics of the relief, such as vertical and horizontal dissection, slope angles, slope exposure, allows us to determine the most promising areas for further use, for example, for organizing tourist routes, creating infrastructure and ecotourism.

Keywords: relief, horizontal dissection, vertical dissection, surface slope, slope exposure, landscape diversity, assessment map.

Assessment of the morphometric conditions of the modern relief of the Semipalatinsk nuclear test site

Adilet Valeyev^{1,2}, Aizhan Assylbekova^{2,3*}, Omirzhan Taukebayev^{2,3}, Muratbek Kudaibergenov², Nazym Zhengissova^{2,3}, Yerkebulan Zhanatbekov², Timur Imandosov²

¹Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan; adiletv@gmail.com

²Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; adiletv@gmail.com, aizhan.asylbekova@kaznu.edu.kz, omirzhan.taukebayev@gmail.com, kudaibergenov.muratbek@gmail.com, jenisnaz@gmail.com, zhanatbekoverke@gmail.com, imandosovt@gmail.com

³ Space Technologies, and Remote Sensing Center, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; aizhan.asylbekova@kaznu.edu.kz, omirzhan.taukebayev@gmail.com, jenisnaz@gmail.com

*Correspondence: aizhan.asylbekova@kaznu.edu.kz

Citation: Valeyev, A., Assylbekova, A., Taukebayev, O., Kudaibergenov, M., Zhengissova, N., Zhanatbekov, Ye., Imandosov, T. (2025). Assessment of the morphometric conditions of the modern relief of the Semipalatinsk nuclear test site. *Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 150(1), 111-128. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-111-128>

Academic editor:
N.Ye. Ramazanova

Received: 05.11.2024
Revised: 22.12.2024
Accepted: 11.03.2025
Published: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Abstract: In recent years, the issue of involving part of the former Semipalatinsk Nuclear Test Site (SNTS) in the economic turnover of local agricultural producers has become acute. This is facilitated by comprehensive environmental studies of the landfill territory. However, studies of morphometric conditions with obtaining numerical characteristics of the landfill relief are practically absent. This study is aimed at studying the morphometric conditions of the relief: slope, aspect, density, and depth of dissection to assess the morphometrically determined factors in the development of a number of modern exogeodynamic processes. The study of morphometric conditions was carried out on the basis of processing and analysis of DEMs, which became the input criteria for scoring. Maps were created and their statistical parameters were extracted: slope, aspect, vertical and horizontal dissection and susceptibility of the relief surface to the factors of development of relief formation in the territory of the SNTS. Thematic information is presented on maps of two types: in the context of elementary areas represented by cells (1×1 km) and interpolation of these elementary areas. The results have practical significance for the development of the principles of an adaptive landscape farming system within the study area.

Keywords: nuclear test site; morphometric conditions; relief; slope; DEM; adaptive landscape farming system.

1. Introduction

The territory of the former Semipalatinsk nuclear test site still remains a place for scientific research in various directions; this situation is due to the fact that for more than 50 years, this territory was exposed to nuclear tests carried out by the Soviet Union. More than 450 nuclear explosions over an area of just 18,500 km² changed the natural conditions of area (Parfitt, 2010). First of all, we are, of course, talking about radioactive contamination, which to this day plays a certain negative role in both the development of natural and social processes. Today, scientific and applied research of a wide profile, including monitoring, ecology, the impact of man-made radiation on the environment, radiation safety issues, etc., is carried out by employees of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan ("The periodic scientific and technical journal of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan," 2024). In the territories affected by nuclear tests at the Semipalatinsk test site, a set of measures is being implemented with the aimed at improving the natural environment, state and public environmental assessment of economic and other activities. Furthermore, are being implemented measures to return radiation-contaminated territories to economic circulation (On social protection of citizens affected by nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site, 1992).

To date, in the relevant scientific literature there are no publications devoted to the study of the morphometric conditions of the relief surface of the SNTS territory, assessing it from the point of view of the potential for the occurrence of exogenous natural and anthropogenic processes. Relief is one of the main factors determining the landscape differentiation of the territory (Bondarenko, 2015; Ismailova, 2016). The study of the components of relief morphometry (slope, exposure, erosion network, horizontal and vertical dissection) on the territory of the test site using modern research methods remains insufficient. At the same time, the territory is of particular scientific interest due to the unique-ness of its geological structure, geographical location and the development of relief-forming exogenous processes on it. Various morphometric indicators of relief are widely used in areas where quantitative assessment of the properties of a topographic surface is necessary (Pogorelov, 2015). Taking into account the morphometric characteristics of the relief allows for the rational use of land for economic purposes. Since quantitative indicators of relief are the most visual indicators of the dynamic conditions for the development and functioning of ecosystems, and morphometric analysis plays an important role in ecogeomorphological studies (Khalilov, 2014).

It is worth noting the adoption of the law on the creation of the Semipalatinsk nuclear safety zone on the territory of the former test site. The law provides for the return of suitable land to economic use (Official website The President of the Republic of Kazakhstan). Knowledge of terrain conditions allows the most correct approach to the allocation of buffer, water protection, sanitary protection zones, not only from the point of view of the norms established in the legislation, but taking into account the specific conditions of the territory (Pozachenyuk, 2016). Understanding the values of the morphometric situation allows us to scientifically identify zones with different environmental management regimes by determining the basis of erosion, the transfer of solid particles, and the development of exogenous processes. Among the transfer agents, linear erosion, planar washout, coastal erosion, and gravitational processes stand out; they all form morphometric components that together characterize the relief (Ismailova, 2021). Since the relief of the earth's surface, along with the lithogenic base, is the basis of landscapes, it performs certain functions: 1) participates in the distribution of gravitational energy in space and time: the relief directs the movement of material flows; 2) the relief promotes two types of movement of gravitational flows of matter - radial and lateral - and coordinates the ratio of these flows (Kashiro et al., 2012).

The purpose of this study is to assess the morphometric conditions of the modern SNTS relief to understand the spatial distribution of the development of modern exodynamic processes and their impact on the accumulation and distribution of pollutants, including radioactive ones. A comprehensive morphometric analysis of the territory based on DEM processing in a GIS

environment allows you to quickly and effectively assess the critical properties of the relief, incl. for forecasting and landscape planning purposes (Mikhailov, 2015). Experience in carrying out similar work includes: assessment and ranking by scores using morphometric parameters was carried out to analyze the landscape diversity of the territory (Egemberdieva, 2021), the degree of morphometric intensity of landscape belts and zones, as well as their spatial differentiation throughout the study area (Ismailova, 2021), assessment of the degree of dissection of the relief by linear forms (coefficient of horizontal dissection) (Pavlova, 2013), comprehensive morphometric assessment of the territory (Mikhailov, 2015), assessment of the degree of dismemberment, the degree of ecogeomorphological tension of morphosystems (Khalilov, 2014).

2. Materials and methods

2.1. Description of the Study Area

The Semipalatinsk nuclear test site is located at the intersection of three regions of Kazakhstan: Abay, Pavlodar and Karaganda and covers an area of 18 000 km². Physical geographically, the test site occupies the northeastern part of the small hills of Sary Arka. It is a plain, to the south gradually changing to hilly and low-altitude terrain. During the period of the SNTS functioning (1949-1989) 466 nuclear tests were conducted on its territory, including 30 above-ground, 88 aerial and 348 underground nuclear explosions, with 13 explosions resulting in the release of radioactive gases into the atmosphere (On social protection of citizens affected by nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site).

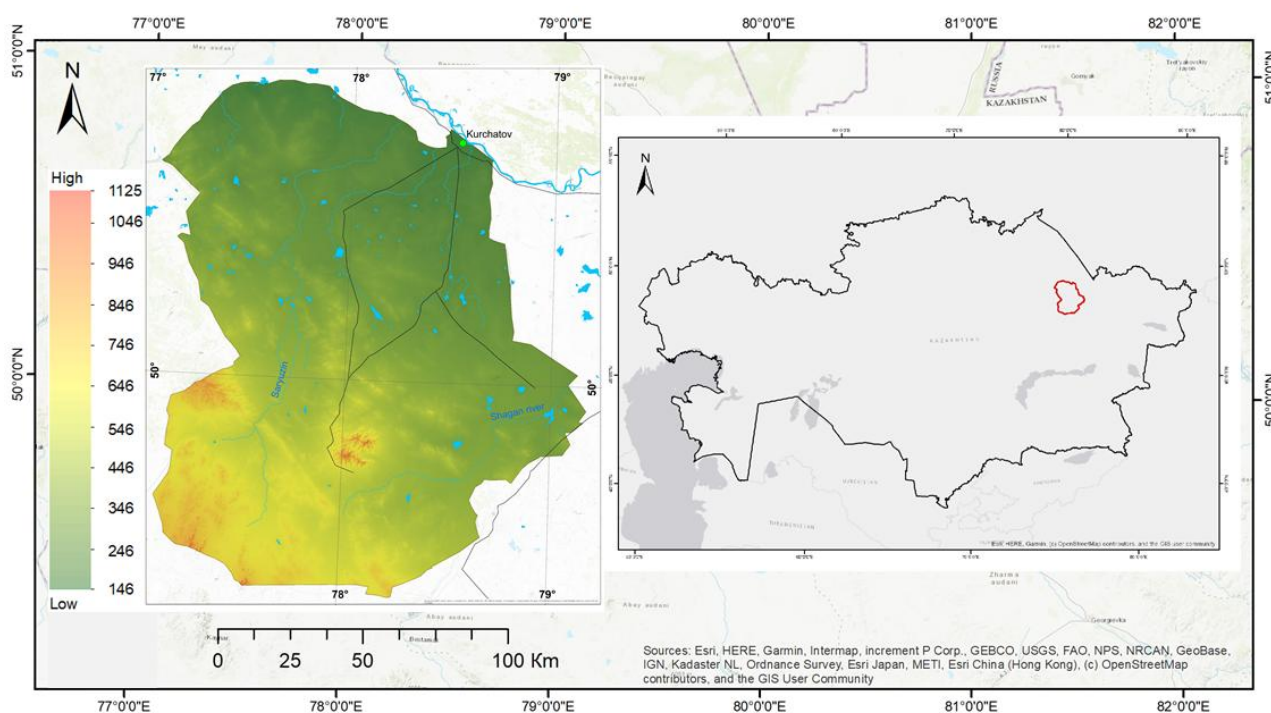


Figure 1. Location map of the SNTS territory

2.2. Data and Methods

Morphometric analysis is one of the methods of geomorphological research in which the quantitative characteristics of landforms are studied using special measurements (Ismailova, 2016). The methods and fundamental principles of morphometric work in the study of geomorphology were studied in great detail in the 1940s and 1950s by Canadian scientists Horton, R.E. and Strahler, A.E. (Pidwirny, 2006). Today, the methodology for morphometric analysis of relief is carried out using remote sensing data, in particular with the use of geographic information systems and digital elevation models. The study of morphometric conditions based on DEM processing has

become widespread among geographers near and far abroad in the study of geomorphology, landscapes, exogenous processes, etc. (Bilous et al., 2020; Bondarenko, 2015; Pogorelov, 2015; Xiong et al., 2022; Zhou & Chen, 2011).

The basis for the work was data from radar interferometric satellite surveys TerraSAR-X and TanDEM-X, and the Airbus WorldDEM4Ortho digital elevation model (Table 1) (<https://elevation.arcgis.com/arcgis/rest/services/WorldElevation>). The available Airbus WorldDEM4Ortho data is in the form of a digital elevation model (DEM) raster file in which the pixel value is the altitude at a given point. The horizontal datum is the World Geodetic System (WGS84-G1150) and the vertical datum is the Earth Gravity Model 2008 (EGM2008) (*Airbus WorldDEM4Ortho in ArcGIS Living Atlas of the World*; DLR Document: TD-GS-PS-0021; DEM Products Specification Document). The Airbus WorldDEM4Ortho data is a DEM with a cell size of 0.8 arcseconds (with a pixel side of 24 m). The resolution of the DEM increases in the direction of longitude from the equator towards the poles. Naturally, the spatial resolution of the DEM affects the spatial accuracy of subsequent mathematical calculations of the relief surface. This applies to the slope, slope aspect and other variables, the values of which respond to the given dimensions of the model cell, and sets the limits of detail of the modeled surface. To obtain a modern layer of water area objects, we used 2 Landsat satellite images (Table 2) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Table 1. Digital elevation model used

DEM	Resolution, m	Pixel spacing	Vertical Unit	File format	Projection	Year
Airbus WorldDEM4Ortho	24	0.8 arcsec	Meter	GeoTIFF	Geographic Coordinates	2017

Table 2. Landsat satellite images used

Satellite	Resolution	Acquisition date	Sensor
Landsat-8	30	09.05.2023	Operational Land Imager
Landsat-8	30	12.09 2022	Operational Land Imager

DEM processing, extraction of morphometric indicators, geospatial mathematical calculation and analysis of results were carried out using ArcGIS 10.5 software. To solve problems, program modules were used in stages:

- Surface (creation of hypsometry, slope, exposure and extraction of contours) (Valeev, 2016);
- Reclassification (mathematical calculations in raster attribute tables, calculation of areas, percentages, processing of Landsat satellite images to extract water areal objects) (Medeu et al., 2023);

- Sampling (Data management – sampling – build a grid) - creation of a Gridfish grid, a vector layer of 1×1 km cells for the study area. The Gridfish grid with cells of 1×1 km is the basic basis for which calculations are made of 4 morphometric indicators (slope, exposure, horizontal and vertical dissection), as well as a complex indicator of morphometric conditions - relief susceptibility. For each cell, the values of indicators per 1 square are determined. km., which are converted into a point object and then a thematic map is constructed by interpolation.

- Zonal statistics into the table (Spatial Analyst – Zonal – Zonal statistics into the table) – absolute elevations and decreases in the territory, as well as their differences, were automatically calculated. In this study, the difference between maximum and minimum heights is the relative height parameter. The result is calculated and presented in dBASE table format, under the column name RANGE. The data is the input parameters for creating a vertical density map). Connecting a

table (Links – Connection) of geodata with a layer of 1×1 km cells. Creation of a map of the amplitude of vertical dissection on a cell scale of 1×1 km.

- Hydrology (erosion network extraction: Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Link, Stream order and Stream to Feature) (Chowdhury, 2023);

- Overlay (Intersection, calculation of the length of the resulting segments inside a cell, spatial connection, calculation of the ratios of the lengths of thalwegs in an area of one cell with an area of 1 km², creation of a map of horizontal division along the field km/km²). the density of dissection of the territory by an erosion network, expressed by the length of thalwegs per unit area (Moglen & Maidment, 2006);

- To spatially create a map of horizontal and vertical dissection: -Spatial objects (Object to a point, export with attributes a layer of cells to a point layer, Interpolation of points of OVR methods, trimming raster edges, reclassifying a raster) for spatial creation of maps of vertical and horizontal dissection (Pozachenyuk, 2016). The resulting vector point layer became the source for interpolation calculations using the inverse weighted distance (IWD) method. The resulting raster was reclassified using Spatial Analyst tools to access individual spatial classes. Next, we converted the vertical dissection raster into a vector layer. We preliminary generalized small objects using spatial object removal tools and smoothed the lines. At the final stage, calculations were made of the areas of distribution of various parameters of vertical division (Table 3).

Table 3. The assessment of morphometric conditions is based on ranking by points, according to the developed criteria

Slope, degrees		Aspect, rhumb		Vertical dissection, m		Horizontal dissection, km/km ²		Degree
Meaning	point	Meaning	point	Meaning	point	Meaning	point	Meaning
0-1	1	N	1	0-20.1	1	0-0.5	1	Low
1-2.9	2	NE, NW	2	20.1-44.6	2	0.5-1.5	2	Weak
2.9-6.4	3	E, W	3	44.6-85.7	3	1.5-2.5	3	Average
6.4-12	4	SE, SW	4	85.7-167.9	4	2.5-3.7	4	Increased
12-43.9	5	S	5	167.9-349.7	5	3.7-7.2	5	High

The criteria include 4 morphometric indicators (slope, aspect, horizontal and vertical division), their physical values and ranking unit. Obviously, these criteria were developed after receiving the numerical results of geoinformation processing of the DEM. For the comprehensive morphometric scoring, all four initial indicators (slope, aspect, horizontal and vertical dissection) were used. In accordance with the parameter values, the gradation and value in points were selected. Scientists use various approaches to defining a comprehensive assessment. For example, to determine a complex morphometric indicator, the addition of all points was used (Mikhailov, 2015), to assess the degree of ecogeomorphological tension of morphosystems, we used a combination of density and depth of division into categories (weak, medium, and high) (Khalilov, 2014), we used the average value of the sum 4 morphometric characteristics of the relief to assess the tourism potential (Sedrette & Rebai, 2022).

Figure 2 shows the study design. A literature review of the methods used to investigate landform morphometry and the study area was conducted. Data was collected for the study area, followed by the processing and extraction of the required geospatial data. The obtained data was analysed and evaluated to determine the susceptibility of the relief.

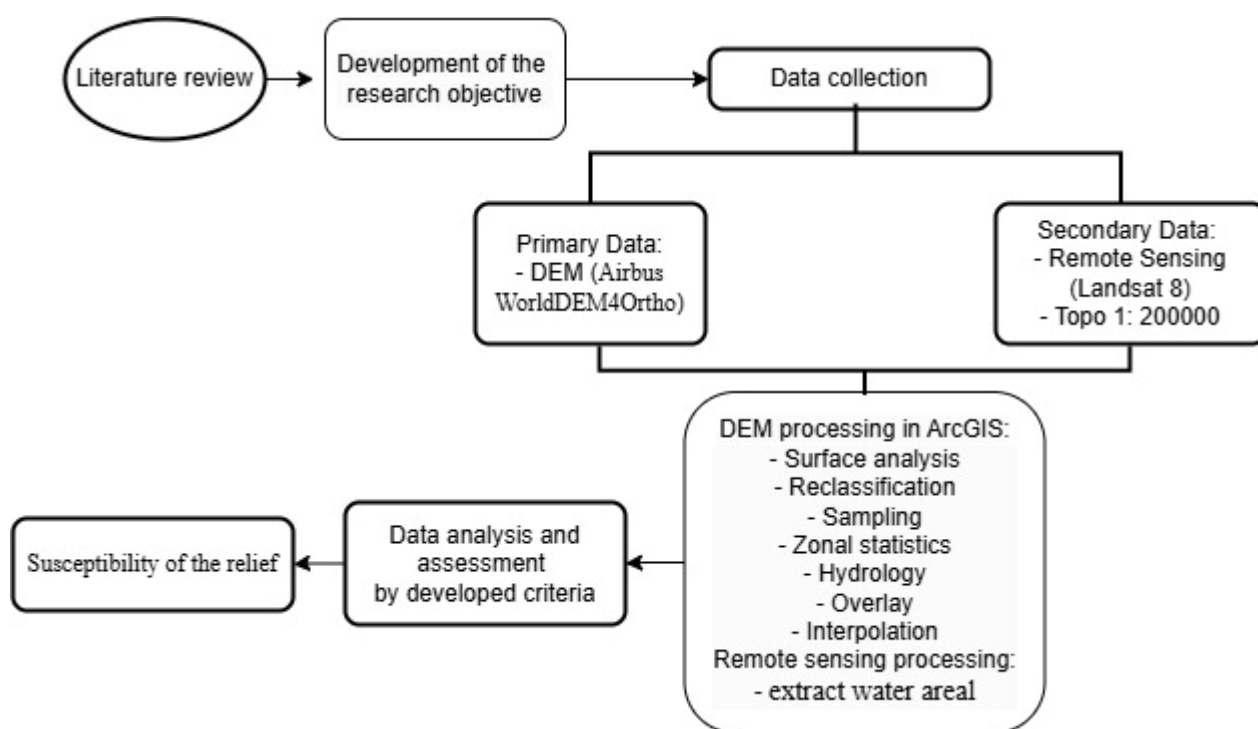


Figure 2. Flow diagram for methodology

3. Results

3.1. Slope, aspect

Slopes and surface aspect are fundamental geomorphological parameters that are naturally associated with the formation of landscapes and the development of exogenous processes and phenomena. The SNTS area is part of the left bank catchment of the Yertis River, so in general the slope trend is towards the main waterway. The northern and eastern territories are plains, in the southern part there are hills and mountains, stretching from southeast to northwest, only the Degelen mountains with the highest elevation (1084 m) have the shape of a circle. The hilly terrain of the eastern end of Sary Arka causes non-uniform surface slope conditions (Figure 3a). Statistical analysis of the ratio of areas with different surface slopes above the edge of local lakes indicates that 91.4% of the SNTS area is characterized by slopes of up to 2.9 degrees, which generally indicates low speeds of the processes of formation of the relief of the plains (Table 4). The development of denudation-erosion phenomena is potentially possible; they are observed in local areas with slopes from 12 to 43.9 degrees, confined to local mountain formations, in total occupies 0.5% of the area of the SNTS. Statistical parameters of the surface slope of the territory are classified into 5 degrees.

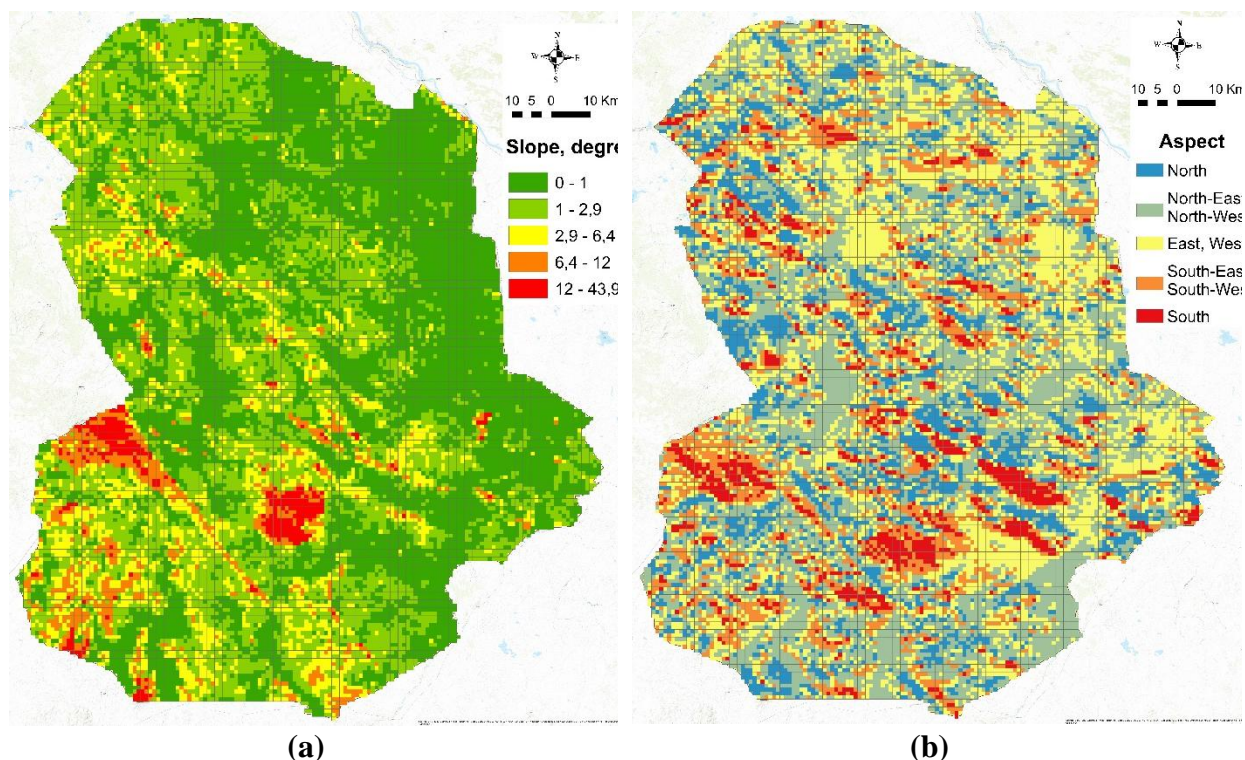


Figure 3. Slope (a), and aspect (b) of the SNTS territory

Slope aspect is considered as the direction of inclination in terms of location to the cardinal direction or compass direction. Measured clockwise in degrees from 0 degrees north to 360 degrees. The value of each cell in the aspect of the data set indicates the direction of the slope (Figure 3b). The aspect of a slope characterizes its orientation in relation to the flow of solar rays, and therefore to the amount of radiation received by the earth's surface (*GIS-Lab online resource*). Due to this, the slope aspect significantly affects the local climate (microclimate) of the site, vegetation, landscape development and relief formation. On the slopes of the relief, northern, northeastern and northwestern aspect predominate and occupy 42% of the study area. Taking into account the heterogeneity of the relief, southern, southeastern and southwestern aspect are widespread, which are located on 33.3% of the territory. These slope aspect are characterized by aridity. The main intensity of erosion is tied to the seasonal processes of snow melting at these aspects. Similarly, the western aspects of the slopes of local mountains fit this description. Western aspects account for more than 10%, and eastern aspects account for more than 13% of the entire territory.

Table 4. Statistical characteristics of the slopes and aspect of the SNTS

Slope, degrees	Area, km ²	Area share, %	Point	Aspect	Area, km ²	Area share, %	Point
0-1	26396.7	59.2	1	N	6881.9	15.4	1
1-2.9	14357.6	32.2	2	NE, NW	11910.2	26.7	2
2.9-6.4	2865.8	6.4	3	E, W	10901.8	24.4	3
6.4-12	762.2	1.7	4	SE, SW	9718.5	21.8	4
12-43.9	221.8	0.5	5	S	5109.6	11.5	5
Total	44604.2	100			44604.2	100	

3.2. Drainage network

An drainage network of temporary and permanent watercourses has been created. After visual viewing of the drainage network vector, it was necessary to refine geometrically flat polylines constructed in places of natural large lake basins and sorrows: Lake Toresor, Lake Zhaksytuz, Lake Shagan, Lake Karasor and others, where dominant accumulative geomorphological processes take place. The parameters of the drainage network depend on the given detail or generalisation, if the output scale allows, the drainage network can be maximally branched and takes into account almost all shallow thalweg of temporary watercourses (Figure 4). Given the flat relief of the territory and the interval of absolute heights between 150 and 1100 metres, the catchment network of watercourses is developed up to the 6th order. There are four large river basins located on the territory of the SNTS. These are the Saryuzin rivers from south to north, Aschyozek and Karabulak from the center to the north, and Shagan from the south to the northeast. They are all left tributaries of the Yertis River.

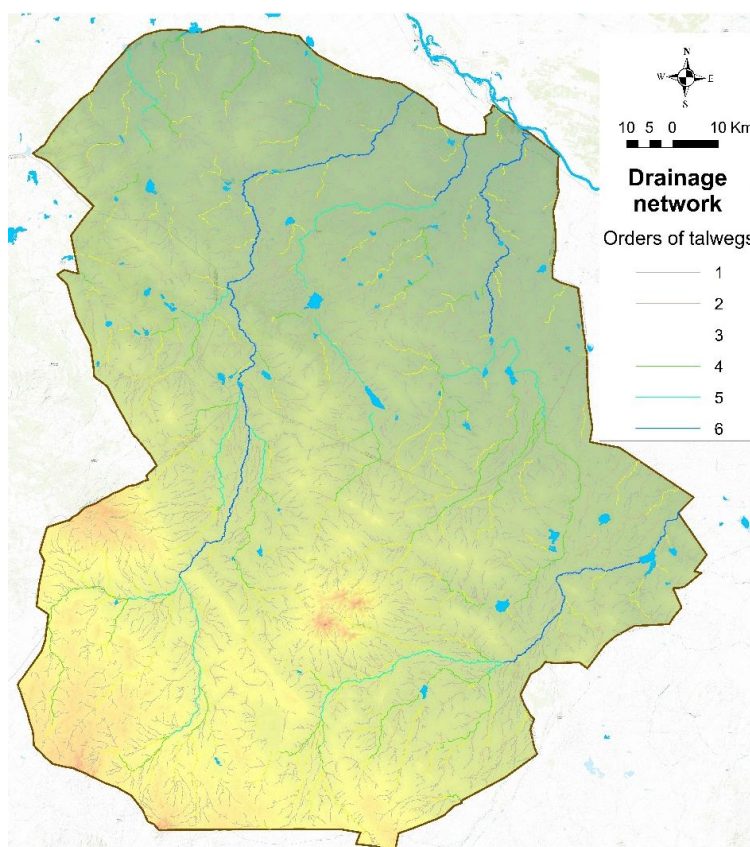


Figure 4. Drainage network of permanent and temporary watercourses, water bodies

The total length of the talwegs of the rivers in the study area is 13,874 km, with sixth-order watercourses accounting for about 361 km or 2% of the total length of temporary and permanent watercourses (Table 5). The main length of 95% of the talwegs, considering the factors of arid climate and steppe landscapes, falls on temporary watercourses. In summer, they form a dry gully-beam network or inconspicuous depressions. They are formed mainly during floods due to meltwater flows, as well as during precipitation in the warm season. The drainage network is formed by the transport of clastic material by first-order water flows, then by 2nd-order water flows and so the solid runoff is carried into the river Yertis. It should be noted that along with solid runoff, the transfer, distribution, and transportation of technogenic pollutants, including

radionuclides, occurs. For example, there is radiation contamination of territories outside the SNTS perimeter, the Shagan River has been found to exceed the norm of radioactive contamination also outside the test site (Aktayev et al., 2021).

Table 5. Statistical characteristics of the drainage network

Order of talwegs	Total length	
	km	%
1	7292	53
2	3394	25
3	1647	12
4	754	5
5	426	3
6	361	2
Total	13874	100

3.3. Vertical dissection

A vector grid (gridfish) has been constructed, elementary areas with an area of 1 km², (1×1 km). In total, the SNTS study area covers 18,423 cells. The relative heights of the RANGE field were previously ranked into five classes using the Natural Boundaries approach. The obtained ranking results formed the basis of the map “The amplitude of the vertical division of the SNTS territory in a section of 1 km²” (Figure 5a). The map is of practical interest for working on medium and large scales work, as the cell displays the values of vertical dissection over an area of 1 km. In general, the map has the appearance of a pixel form, which does not convey the natural boundaries of the distribution of morphometric conditions (vertical and horizontal division) and spatial display. In this connection, to solve the existing uncertainty, a map of the spatial distribution of vertical division indicators was constructed, also ranked into 5 classes (Figure 5b). The resulting map of the areal distribution of vertical dissection made it possible to carry out statistical calculations of the areas of distribution of indicators, as well as to effectively display phenomena on the scale of the study.

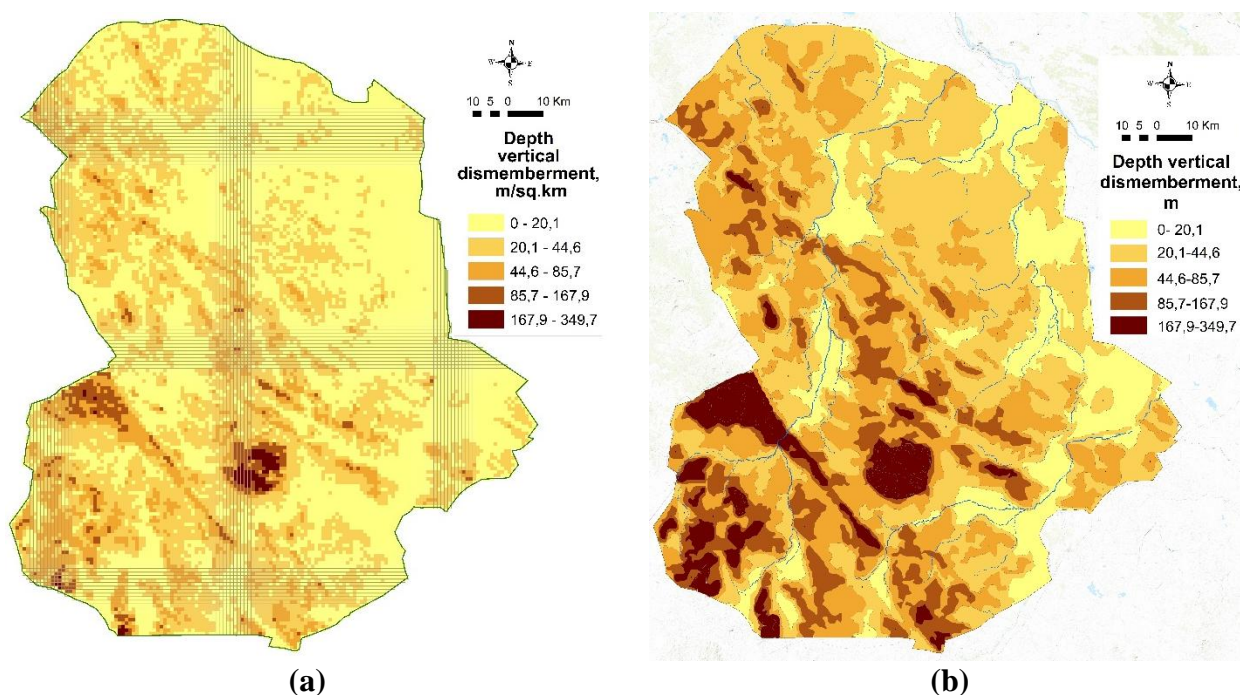


Figure 5. Amplitude of vertical division: (a) in the context of 1×1 km cells; (b) areal

The general hypsometry of the relief, geology, tectonics, linear erosion processes, landscapes and anthropogenic activities are responsible for the formation of vertical dissected relief. The highest dissection is confined to mountain formations in the central and southern parts of the SNTS.

The values of the depths of vertical dissection are not evenly distributed throughout the territory (Table 6). Low vertical dissection (0-20.1 m/km²) in the relief mainly occupy the northeastern and eastern parts of the SNTS, and are also found sporadically throughout the territory in flat areas. Weak depth of dissection (21-44.6 m) is most widespread, occupying 38.5% of all territories. These areas are located in the northern, eastern and central parts of the SNTS, also in flat areas. Low and weak degrees of vertical dissection occupy 54.5% of the territory of the SNTS, which are plains. The average degree of vertical dissection occupies 27.8% of the entire territory. It is mainly developed on the foothill plains located in the central, northwestern and southern parts of the site. An increased and high degree of vertical dissection occupies slightly more than 15% of the territory. It is developed in the central, northwestern and southern parts of the site and is confined to hills and mountains. The range of relative height marks is from 85 to 350 meters.

Table 6. Statistical parameters of dissection depth values

Depth of dissection, m/km ²	Area, km ²	Per cent of total area, %
0 – 20.1	2 935	16
21 - 44.6	7 064	39
44.6 - 85.7	5 114	29
85.7 - 167.9	2 140	12
167.9 – 349.7	1 109	4

3.4. Horizontal dissection

A horizontal dissection map has been created. As an indicator of horizontal dissection, the length of talwegs of erosional forms from 1st to 7th order (permanent and temporary watercourses) per unit cell area, km/km², was used (Figure 6a). The horizontal division values on the map are ranked into 5 classes, where the general interval ranges from 0.0 to 7.2 km/km². In 905 km², the value of horizontal dissection ranges from 3.7 to 7.2 km/km². A map of horizontal dissection at a cell scale of 1 km² (gridfish grid) is of practical importance for work on a medium and large scale. To obtain natural contours and areas of the spatial distribution of horizontal dissection conditions, an aerial location map was produced (Figure 6b), based on interpolation of cell values.

The distribution of horizontal division values across the territory is uneven. So low levels are confined to watersheds and local lake basins. Obviously, the watersheds are composed of crystalline rocks and are at the stage of insignificant erosional influence, while in lake basins the processes of accumulation prevail over erosion. Medium and high degrees are observed along the river valleys of the SNTS in both flat and mountainous areas. The pattern of distribution of large values of the density of horizontal erosion is characteristic of intermountain depressions and plains.

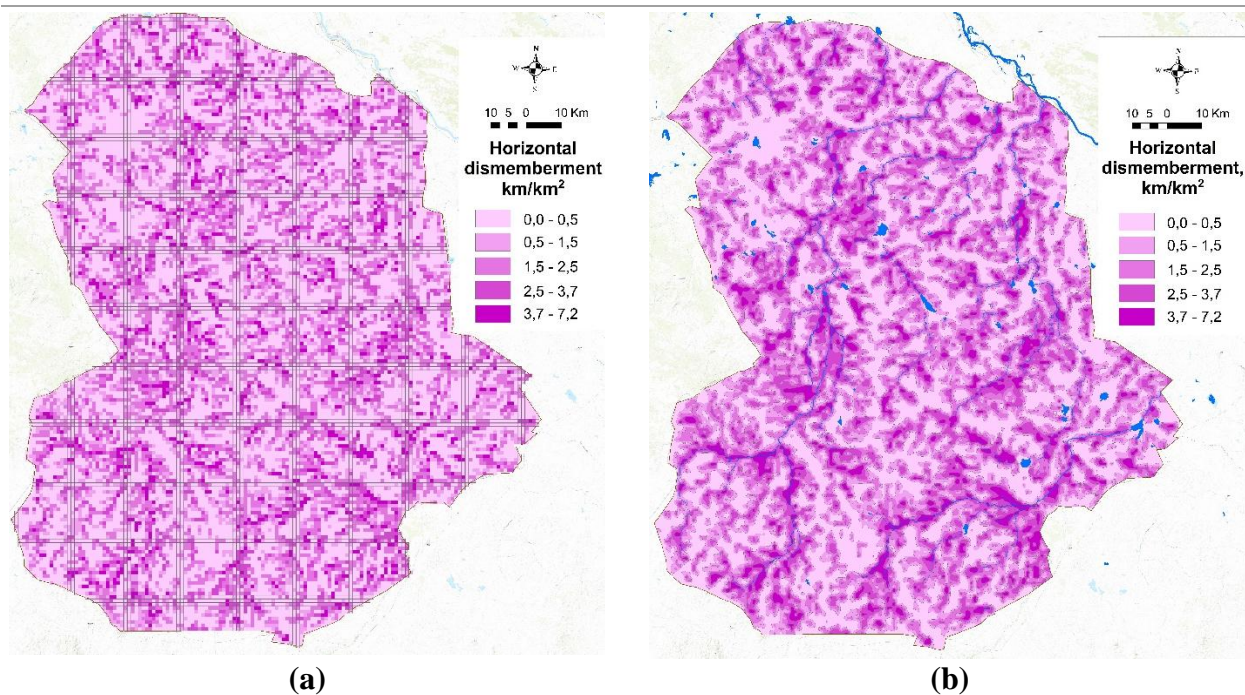


Figure 6. Horizontal dissection of the relief: (a) in the context of 1×1 km cells; (b) areal distribution

A statistical analysis of the horizontal division map was performed, and the areas of distribution of various values were determined (Table 7). The territory of the test site, where the length of the drainage network for 14 square kilometers does not exceed 600 meters, occupies 31% of the total area of the SNTS. In the study, we ranked this area as having a low degree. The plots are distributed evenly throughout the polygon. The weak degree (0.6 – 1.2 km/km²) occupies only 25% and is also distributed evenly throughout the entire SNTS territory. Average values (1.2 – 1.8 km/km²) are located in 23% of the study area. Increased and high rates of horizontal dissection occupy 15% and 6%, respectively. They are distributed throughout the test site, but have local forms. There is an inverse correlation with increasing values of horizontal dissection; the area of distribution decreases.

Table 7. Statistical parameters of horizontal division values

Horizontal dissection, km/km ²	Area, km ²	Per cent of total area, %
0 – 0.6	5 687	31
0.6 – 1.2	4 632	25
1.2 – 1.8	4 197	23
1.8 – 2.6	2 815	15
2.6 – 6.4	1 033	6

A complex morphometric indicator is the ratio of the sum of indicator values to their number (in terms of cells 1×1 km). The indicator characterizes the general current state of dissection of the relief surface. So, depending on the hypsometric properties, the relief is under the constant influence of denudation or accumulative processes. Therefore, in this study, we consider a complex morphometric indicator as the susceptibility of the relief surface to the development of exogenous processes. Similar to the previous maps, the assessment of the susceptibility of the relief is constructed in terms of cells (1 × 1 km) and areal distribution on a five-point scale (Figure 7).

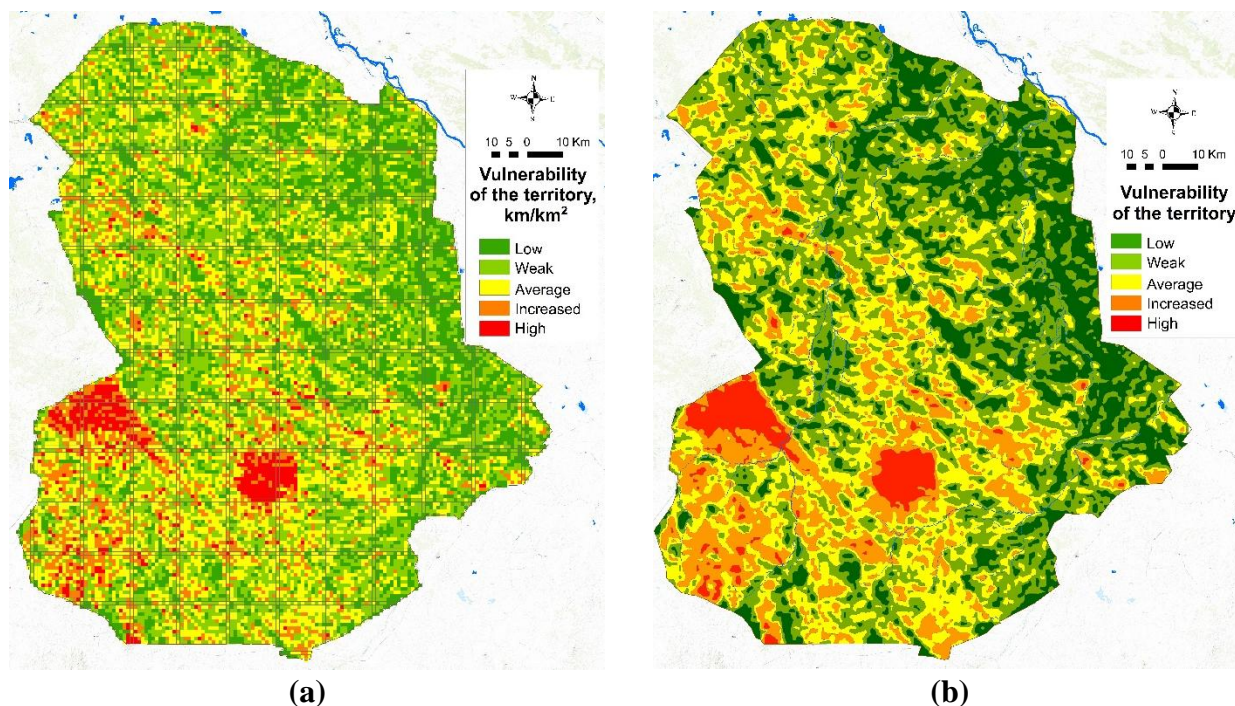


Figure 7. Susceptibility of the relief surface to the development factors of relief formation: (a) in the context of 1×1 km cells; (b) areal distribution

The result of geospatial analysis of the obtained maps are the numerical values of the territory's susceptibility to the factors of the territory's relief formation development and the area of distribution (Table 8). Low and weak susceptibility of the relief surface covers 53% of the SNTS territory, mainly the flat areas of the northeastern and eastern parts of the test site. In these areas, low and weak values of vertical and horizontal dissection, weak slopes and slopes with northern aspects are observed. The average susceptibility of the relief surface occupies 28% of the test site, mainly hilly and foothill plains. The sites are distributed in the northern, central and southern parts. They are associated with average values of vertical and horizontal dissection, slopes up to 45% and eastern and western aspects of slopes. Increased and high susceptibility of the relief surface occupies 19% of the landfill area. These are positive forms of relief, where mountains have a high degree of susceptibility and hills have an increased degree of susceptibility. These territories are characterized by an increased and high degree of horizontal and vertical dissection, a slope steepness of more than 45%, and a predominance of southern aspects.

Table 8. Susceptibility of the relief surface to the development factors of relief formation in the territory of the SNTS

Relief surface susceptibility	Area, km ²	Per cent of total area, %
Low	3 649	20
Weak	6 125	33
Average	5 082	28
Increased	2 669	15
High	641	4
Total	18166	100

4. Discussion

The results of the study confirm the basic basis of the relief as a natural environment, where other processes occur due to natural and anthropogenic factors. The presence of erosion network up to 7th order, as well as a number of antecedent valleys confirm the results of studies of solids transport by temporary flows, obtained by (Moss & Walker, 1978). Application of complex morphometric index for relief assessment allows to take into account the main characteristics of the terrain: slope, exposure, vertical and horizontal dissection. The final map of the relief susceptibility to modern exogenous processes provides a general classification of the entire territory by assessment values, which is convenient for perception and study of the relief of the territory. Presentation of the results of morphometric indicators assessment in the grid format has more applied character. And the interpolated version of maps, gives a general concept of distribution of morphometric conditions of the area.

Relief formation processes in steppe landscapes are not highly dynamic, with geological structure and vegetation acting as one of the stabilisation factors. However, the sharply continental climate, spring floods and precipitation figuratively set in motion the transport of solid particles towards local and regional erosion bases. Aspects influencing particle transport include terrain morphometry. Parameters of relief morphometry have a direct correlation with the intensity of exogenous processes.

Thus, terrain slopes up to 2.9 degrees are spread over 91.4% of the SNTS area, which indicates a weak impact of gravitational processes, but a sufficient level for the development of linear erosion and plane washout on the plains.

Relief exposure is responsible for soil moisture content and, consequently, for the level of projective cover of vegetation. Thus 33.3% of the study area is located on southern, south-eastern and south-western exposures. Accordingly, these territories are more susceptible to the transport of solid particles than the northern exposures. The base of erosion of the territory is the Yertis River. Therefore, the development of the network of temporary and permanent watercourses is directed to the north. This is also the direction of particulate matter transport in general.

Vertical dissection of relief is developed practically over the whole territory of the SNTS. However, the contribution of erosion processes to the development of vertical dissection in the mountainous areas of the study area is more significant than in the plains. This is explained by different morphometric conditions of the area (slope, absolute heights, landforms). For example, the vertical dissection in the Murzhik Mountains under the influence of the temporary Saryuzin watercourse, which formed the antecedent valley, is more than 110 meters. On the plains, the erosive activity of permanent and temporary watercourses formed channel valleys with relative heights of 10-17 m in the hilly areas and up to 5 meters in the lower reaches on the plains.

Horizontal dissection is in the range from 0.5 to 7.2 km of linear erosion per 1 km². High density of linear erosion per unit area is confined to river valleys and erosion network of temporary watercourses. The density decreases only on watersheds, especially the outlines of crystalline rock formations are clearly distinguished. Here it should be noted that the removal of solid particles occurs, respectively, from areas with high density of horizontal dissection.

According to the results of assessment of the territory's susceptibility to the development of exogenous processes, 53% of the territory of the SNTS have low and weak degrees. These are mainly flat areas of the north-eastern and eastern part of the polygon. These results indicate that half of the territory of the former SNTS with respect to relief morphometry is potentially suitable for the development of adaptive landscapes.

A limitation of the study was not to use the weighted scoring method in the scoring criteria. Since it was the first time that morphometric conditions were assessed on the basis of DEM analysis, and there are no alternative results obtained by this method, and wide access to the territory of the polygon is limited, we decided to first obtain primary data and assess them without weights. However, the criteria of relief assessment, developed solely on the quantitative and

qualitative parameters of morphometry of exactly the territory of the SNTS. Therefore, the results obtained are as close as possible to the level of reliability.

Further study of the SNTS territory should be carried out with the involvement of interdisciplinary specialists and empirical research methods. Conduct comprehensive field studies, soil and water sampling for laboratory analyses, linking the sampling sites to the coordinate system, and determining traces of radioactive elements. Link laboratory analysis results with geospatial tools to interpolate similar results and map actual materials. These studies will make it possible to determine the degree of correlation of morphometric conditions with the modern spatial distribution of radioactive contamination areas.

This paper provides a basic framework for understanding the processes of particulate matter transport over the relief surface and identifying areas that meet the requirements of adaptive landscapes. The relief occupies a leading role in natural environments, where the processes of transport and distribution of pollutants, among others, take place. Taking into account this fact and the obtained results are of scientific interest for specialists of science and education in the field of geoecology, radioecology, and agriculture.

5. Conclusion

The activity of permanent and temporary watercourses is the driving force in relief formation, as evidenced by the presence of antecedent valleys within the SNTS. This provision is the basis to assume the transfer of surface and possibly underground radioactive pollutants by permanent and temporary watercourses. With regard to the base of erosion of the Yertis River, it is possible to designate potential areas of spread of secondary radioactive contamination. Thus, the study of the morphometric conditions of the SNTS territory allowed to determine the numerical characteristics of vertical and horizontal dissection and to assess the susceptibility of the territory to the factors of relief formation development. The morphometric characteristics of the relief are an important aspect in the study of geoecology and landscape development. At a glance, the researcher understands the direction of total solid runoff, solar radiation, slope processes and erosion. The fact of anthropogenic influence on the relief and radioactive contamination is of particular relevance. The scale of the study (1×1 km) makes it possible to rationally and effectively zone and involve the landfill territory in agricultural use, taking into account the adaptive landscape farming system. The morphometric conditions of the relief, being the basic basis, allow us to understand the ongoing processes, their cause-and-effect relationships and draw certain, scientifically based conclusions.

6. Supplementary Materials: No Supplementary Materials.

7. Author Contributions

Conceptualization, A.A. and A.V.; methodology, O.T., A.V., M.K.; software, N.Zh., T.I.; validation, A.A., O.T., A.V.; formal analysis, O.T., N.Zh.; investigation, A.A. and M.K.; resources, N.Zh.; data curation, Y.Zh., N.Zh.; writing original draft preparation, A.V.; writing review and editing, A.A., O.T.; visualization, A.V. and M.K.; supervision, A.V.; project administration, A.A.; funding acquisition, A.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Adilet Valeyev - researcher, PhD, JSC Institute of Geography and Water Security, Seifullin st. 458/1, Almaty, Kazakhstan, 050000. Senior Lecturer Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050010; adiletv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9380-351X>

Aizhan Assylbekova - researcher, PhD, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty 050010, Kazakhstan; aizhan.assylbekova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8609-3855>

Omirezhan Taukebayev - researcher, PhD candidate, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; omirezhan.taukebayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7959-1434>

Muratbek Kudaibergenov - researcher, PhD candidate, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; kudaibergenov.muratbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8316-8949>

Nazym Zhengissova - researcher, Ph.D student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; jenisnaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0618-1204>

Yerkebulan Zhanatbekov - researcher, PhD candidate, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; zhanatbekoverke@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5309-5490>

Timur Imandosov - researcher, Master student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; imandosovt@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2903-1536>

9. Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP19579264.

10. Acknowledgements: We thank the editor and unknown reviewers of the journal BULLETIN of L.N. Gumilyov Eurasian National University (CHEMISTRY. GEOGRAPHY. ECOLOGY Series) for checking the manuscript and valuable comments. The comments allowed to improve the quality of the manuscript considerably and to bring the manuscript to the standard of a full scientific article. Associate Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Candidate of Geological Sciences A.A. Ulman for preliminary revision of the manuscript, discussion of the methods and results section.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Airbus WorldDEM4Ortho in ArcGIS Living Atlas of the World. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-living-atlas/imagery/airbus-worlddem4ortho-in-arcgis-living-atlas-of-the-world/>
2. Aktayev, M. R., Aidarkhanov, A. O., Aidarkhanova, A. K., Pronin, S. S., & Iskenov, A. O. (2021). Monitoring of Tritium Pollution of the Shagan River Waters. *NNC RK Bulletin*, 2, 25-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-25-29>
3. Bilous, L., Shyshchenko, P., Samoilenko, V., & Havrylenko, O. (2020). Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 20, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo124>
4. Bondarenko, M. A., Mikhailov, V. A. (2015). Landscape-morphometric analysis of the territory using GIS (using the example of the northern macroslope of the Main Ridge of the Crimean Mountains). *Modern scientific research and innovation*, 8-2, 85-94.
5. Chowdhury, M. S. (2023). Modelling hydrological factors from DEM using GIS. *MethodsX*, 10, 102062.
6. DLR Document: TD-GS-PS-0021; DEM Products Specification Document, V. https://api.oneatlas.airbus.com/documents/2018-07_WorldDEM4Ortho_TechnicalSpec_Version1.4_11.0.pdf
7. Egemberdieva, K. B. (2021). Assessment of the tourist potential of the relief for the purpose of sustainable tourism development using the example of the Shchuchinsk-Borovsk resort area. *Geography and water resources*, 3, 52-58.
8. GIS-Lab online resource. <http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>.

9. Ismailova, L. A. (2016). Assessment of the relief in order to study the landscape differentiation of mountain geosystems (territories between the Dashagilchay and Girdymanchay rivers). *Journal of Geography and Environmental Management*, 42(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26577/JGEM.2016.1.278>
10. Ismailova, L. A. (2021). The influence of morphometric indicators of the relief on the formation of landscapes of the Southeastern slope of the Greater Caucasus. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, 1/2, 53-59.
11. Kashiro, M. A., Zhilina, T. N., Vasilyeva, M. S., & Evseeva, N. S. (2012). Ecological and geomorphological studies of the Basandaika River basin (Tomsk region). *Vestnik of Tomsk State University*, 362, 184-188.
12. Khalilov, G. A., Abushova, S. N. (2014). Morphometric method of ecogeomorphological assessment of the relief of the Republic of Azerbaijan (using the example of the Khramizayam interfluve). *Geographical Bulletin*, 4(31), 17-21.
13. Medeu, A., Valeyev, A., Akiyanova, F., Lyy, Y., Issanova, G., & Ge, Y. (2023). Assessment of the Vulnerability of the Coast of Lake Alakol to Modern Geomorphological Processes of Relief Formation. *Land*, 12(7), 1475.
14. Mikhailov, V. A. (2015). Complex morphometric analysis of the Tarkhankut Peninsula using GIS. *Modern scientific research and innovation*, 2-4, 5-13.
15. Moglen, G. E., & Maidment, D. R. (2006). Digital elevation model analysis and geographic information systems. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*.
16. Moss, A., & Walker, P. (1978). Particle transport by continental water flows in relation to erosion, deposition, soils, and human activities. *Sedimentary Geology*, 20, 81-139.
17. *Official website The President of the Republic of Kazakhstan*. <https://www.akorda.kz/ru/prezident-podpisal-zakon-o-semipalatinskoy-zone-yadernoy-bezopasnosti-565410>
18. *On social protection of citizens affected by nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site*. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31488792
19. *On social protection of citizens affected by nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site*. (1992). https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=1001550&pos=113;-50#%20pos=113;%20-%2050
20. Parfitt, T. (2010). Nuclear tests leave Kazakhstan still searching for answers. *The Lancet*, 376(9749), 1289-1290.
21. Pavlova, A. I. (2013). Morphometric analysis of the relief using GIS. *Interexpo Geo-Siberia*, 3(4), 166-169.
22. The periodic scientific and technical journal of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. (2024). *NNC RK Bulletin*. <https://journals.nnc.kz/jour>
23. Pidwirny, M. (2006). Stream morphometry. *Fundamentals of physical geography*. In.
24. Pogorelov, A. V., & Dumit, Zh.A. (2015). Morphometry of the Kuban River basin relief: some results of digital modeling. *Geographical studies of the Krasnodar region*, 2, 7-23.
25. Pozachenyuk, E. A., & Petlyukova, E.A. (2016). GIS- analysis of morphometric indicators of the central foothills of the Main Ridge of the Crimean Mountains for the purposes of landscape planning. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Geography.*, 2(2), 97-113.
26. Sedrette, S., & Rebai, N. (2022). A GIS Approach Using Morphometric Data Analysis for the Identification of Subsurface Recent Tectonic Activity. Case Study in Quaternary Outcrops - North West of Tunisia. *Journal of Geographic Information System*, 14(1), 94-112.
27. Valeev, A. G., Akiyanova, F. Zh., & Abitbaeva, A. D. (2016). Morphometric features of the formation of river flow in the Alakol depression basin and its influence on the development of relief formation of the coastal zone of Lake Alakol. Water resources of central asia and their use. Materials of the *International Scientific and Practical Conference dedicated to*

summing up the results of the “Water for Life” decade declared by the UN., Almaty, Kazakhstan.

28. Xiong, L., Li, S., Tang, G., & Strobl, J. (2022). Geomorphometry and terrain analysis: Data, methods, platforms and applications. *Earth-Science Reviews*, 233, 104191.
29. Zhou, Q., & Chen, Y. (2011). Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1), 38-45.

Семей ядролық сынақ полигонының қазіргі рельефінің морфометриялық жағдайын бағалау

Адилет Валеев, Айжан Асылбекова, Омиржан Таукебаев, Муратбек Кудайбергенов, Назым Жеңісова, Еркебулан Жанатбеков, Тимур Имандосов

Аңдатпа: Соңғы жылдары бұрынғы Семей ядролық сынақ полигоны (СЯСП) жерлерінің бір бөлігін жергілікті ауыл шаруашылығы өндірушілерінің шаруашылық айналымына тарту мәселесі өткір тұр. Бұған полигон аумағын кешенді экологиялық зерттеулер ықпал етеді. Алайда, полигон рельефінің сандық сипаттамаларын ала отырып, морфометриялық жағдайларды зерттеу іс жүзінде жоқ. Бұл зерттеу рельефтің морфометриялық жағдайларын: бірқатар заманауи экзогеодинамикалық процестердің дамуындағы морфометриялық анықталған факторларды бағалау үшін көлбеу, аспект, тығыздық және бөлшектеу тереңдігін зерттеуге бағытталған. Морфометриялық жағдайларды зерттеу dem деректерін өңдеу және талдау негізінде жүргізілді, олар ұпай жинаудың кіріс критерийлеріне айналды. Карталар жасалып, олардың статистикалық параметрлері: көлбеу, көрініс, тік және көлденең бөлшектеу және рельеф бетінің СЯСП аумағындағы рельефтің пайда болу факторларына сезімталдығы бөлінді. Тақырыптық ақпарат екі типтегі карталарда: ұяшықтармен (1×1 км) ұсынылған қарапайым учаскелер бөлігінде және осы қарапайым учаскелердің интерполяциясы түрінде ұсынылған. Нәтижелер зерттелетін аумақта адаптивті ландшафттық егіншілік жүйесінің принциптерін әзірлеу үшін практикалық маңызды.

Түйін сөздер: ядролық полигон; морфометриялық жағдайлар; рельеф; беткей; ЖСМ; адаптивті-ландшафттық егіншілік жүйесі.

Оценка морфометрических условий современного рельефа Семипалатинского испытательного ядерного полигона

Адилет Валеев, Айжан Асылбекова, Омиржан Таукебаев, Муратбек Кудайбергенов, Назым Жеңісова, Еркебулан Жанатбеков, Тимур Имандосов

Аннотация: В последние годы остро встал вопрос вовлечения части земель бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИЯП) в хозяйственный оборот местных сельхозпроизводителей. Этому способствуют комплексные экологические исследования территории полигона. Однако исследования морфометрических условий с получением численных характеристик рельефа полигона практически отсутствуют. Данное исследование направлено на изучение морфометрических условий рельефа: уклона, аспекта, плотности и глубины расчленения для оценки морфометрически определяемых факторов в развитии ряда современных экзогеодинамических процессов. Изучение морфометрических условий проводилось на основе обработки и анализа данных ЦМР, которые стали входными критериями для подсчета очков. Были созданы карты и выделены их статистические

параметры: уклон, вид, вертикальная и горизонтальная расчлененность и восприимчивость поверхности рельефа к факторам развития рельефообразования на территории СИЯП. Тематическая информация представлена на картах двух типов: в разрезе элементарных участков, представленных ячейками (1×1 км), и в виде интерполяции этих элементарных участков. Результаты имеют практическое значение для разработки принципов адаптивной ландшафтной системы земледелия на исследуемой территории.

Ключевые слова: ядерный полигон; морфометрические условия; рельеф; склон; ЦМР; адаптивно-ландшафтная система земледелия.

Моделирование элементов водного баланса бассейна реки Сарысу на основе данных гидрологических и климатических наблюдений

Жумахан Мустафаев¹, Гульмира Адильбектеги^{*2}, Канат Мустафаев³, Куаныш Абдешев⁴, Гулнур Саспугаева², Нуржан Турсынбаев²

¹АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; z-mustafa@rambler.ru

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; adilbektegi_ga@enu.kz, gulnur_erzhanovna@mail.ru, nurANT_78@mail.ru

³ТОО «Genc kz construction», Алматы, Казахстан; kmustafaev@gmail.com

⁴Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауезова, Шымкент, Казахстан; abdeshev.kuanysh@mail.ru

*Корреспонденция: adilbektegi_ga@enu.kz

Цитирование: Мустафаев, Ж., Адильбектеги, Г., Мустафаев, К., Абдешев, К., Саспугаева, Г., Турсынбаев, Н. (2025). Моделирование элементов водного баланса бассейна реки Сарысу на основе данных гидрологических и климатических наблюдений. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 129-151.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-129-151>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 05.01.2025
Исправлена: 31.01.2025
Принята: 11.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. Для анализа и оценки водных ресурсов в зоне формирования стока бассейна реки Сарысу использованы данные о среднегодовых расходах воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау, а также информация о годовых осадках, зарегистрированных на метеорологических станциях Аксу-Аюлы, Агадыр, Актогай и Улытау, относительно равномерно расположенных в пределах низгорья Казахского мелкосопочника, за период наблюдений с 1940 по 2021 годы. Анализ и оценка на основе достаточно длительных временных рядов гидрологического стока рек и годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием методов разностных интегральных кривых показывают наличие циклических колебаний, обусловленных многообразием реакции водосборов на выпадающие осадки, которые носят синхронный характер, включая кратковременные циклы, характерные для отдельных фаз подъема и спада. Статистически обоснованная оценка параметров линейно-корреляционного уравнения водного баланса рек, характеризующего зависимость гидрологического стока от атмосферных осадков, выпадающих на водосборе бассейна реки Сарысу, служит научной основой для разработки математических моделей элементов водного баланса. Эти модели включают потенциально-возможный слой речного стока, влагозапасы почвенного покрова по испарению, испарение атмосферных осадков в процессе водообразования, суммарное испарение и паводковый сток, основанные на математических и физических характеристиках коэффициента регрессии.

Ключевые слова: уравнение водного баланса, линейно-корреляционное уравнение, речной сток, атмосферные осадки, коэффициент регрессии, суммарное испарение, влагозапасы почвенного покрова.

1. Введение

Уравнение водного баланса водосбора речных бассейнов, базирующегося на тезисе Воейкова, А.И. – «река - продукт климата», подразумевает, что среднегодовой речной сток является функцией годовых атмосферных осадков и испарения, отражающих то соотношение тепла и влаги, которое свойственно данной географической зоне, которое за известный промежуток времени характеризуется балансом прихода и расхода энергии, иначе говоря, законом сохранения энергии. На основе генетической теории речного стока, основанной на законе сохранения энергии и раскрывающей причинные связи не только стока, но и элементов водного баланса, знаменитым ученым Воейковым, А.И. (1949) впервые было предложено трехчленное уравнение: $AP_i = RF_i + TE_i$ (где AP - атмосферные осадки, мм; RF_i - речной сток, мм; TE_i - суммарное испарение, мм), которое в определенной степени характеризует линейную связь слоя речного стока (RF_i) со слоем атмосферных осадков (AP_i), и имеет следующий вид: $RF_i = k \cdot AP_i + b$ (где k - коэффициент регрессии; b - свободный член уравнения). Это уравнение стало объектом исследования в области прикладной гидрологии.

Коэффициент регрессии (k) корреляционных зависимостей среднегодовых слоев речного стока (RF_i) от атмосферных осадков (AP_i) в теории математической статистики представляет собой произведение коэффициента корреляции между переменными RF_i и AP_i на соотношение среднеквадратических отклонений каждой переменной SD_{AP_i} и SD_{RF_i} :

$$k = R_{AP \cdot RF_i} (SD_{RF_i} / SD_{AP_i}), \quad (1)$$

где $R_{AP \cdot RF_i}$ - коэффициент корреляции между среднегодовым слоем речного стока (RF_i) и атмосферными осадками (AP_i); SD_{RF_i} - среднеквадратическое отклонение среднегодовых слоев речного стока (RF_i); SD_{AP_i} - среднеквадратическое отклонение атмосферных осадков (AP_i).

На протяжении более 100 лет было выполнено множество исследований, основанных на предложениях Воейкова, А.И. в которых предпринимались попытки направленные на совершенствование структуры уравнения водного баланса речных бассейнов. Эти исследования опирались на логические соображения и естественнонаучные представления о механизмах формирования гидрологического стока как функции атмосферных осадков:

- в области гидрологии известно уравнение водного баланса речных бассейнов для многолетнего периода, предложенное Великановым, М.А. (1948), Алексеевым, А.Г. (1948) и Куделиным, Б.И. (1960), на основе генетической теории стока, созданной Бефани, А.Н. (1957), где отражается реальное питание подземных вод и инфильтрации за счет атмосферных осадков, которые существует в природе параллельно друг другу, со своим условием формирования;

- из истории развития создания теории водно-балансовых уравнений речных бассейнов известны работы Келлера, Г. (1965), Ольдекопа, Э.М. (1911), Великанова, М.А. (1948) и Оппокова, Е.В. (1935), которые предложили модель коэффициента стока (RC_i), являющейся одной из модификаций уравнения водного баланса речных бассейнов:

$$\begin{aligned}
 RC_i &= \alpha - (b/AP_i) \rightarrow RC_i = 1 - th(TE_i/AP_i) \rightarrow F/AP_i = \\
 &= \alpha - (b/AP_i) \rightarrow RF_i/AP_i = (\alpha \cdot AP_i - b)/AP_i \rightarrow RF_i = \alpha \cdot AP_i + b \rightarrow \\
 &\rightarrow dRF_i/dAP_i + dTE_i/AP_i = 1 \rightarrow RR_i = \alpha \cdot AP_i + b \rightarrow TE_i = \\
 &= (1 - \alpha) \cdot AP_i - b,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где α и $(1 - \alpha)$ - тангенсы углов наклона прямых; b - постоянная интегрирования;

- для учета территориальной неоднородности формирования водного баланса речных бассейнов, имеющих разное генетическое происхождение, Львович, М.И. (1974) впервые предложил шестикомпонентную систему уравнений водного баланса: $(AP_i = SCRF_i + UCRF_i + QMT_i; RF_i = SCRF_i + UCRF_i; QMT = AP_i - SCRF_i = UCRF_i + TE_i; EC_i = UCRF_i / QMT_i; CQR_i = 1 - EC_i = TE_i / QMT_i)$, где $SCRF_i$ - поверхностная составляющая речного стока; $UCRF_i$ - подземная составляющая речного стока; QMT_i - валовое увлажнение территории; EC_i - коэффициент испарения; CQR_i - коэффициент питания рек подземными водами. Эти уравнения в явном виде не учитывают потери атмосферных осадков на инфильтрационное питание грунтовых вод, и с целью устранения этих недостатков Коронкевич, Н.И. (2005) разработал уравнение водного баланса многолетнего периода полиструктурного водного баланса, состоящего из девяти блоков.

Одним из фундаментальных направлений по оценке водного баланса речных бассейнов является направление, развиваемое в работах Исмайылова, Г.Х., Федорова, В.М. (Исмайылова и др., 2011), Исмайыловой, И.Г., Исмайылова, Г.Х., Муращенковой, Н.В., Перминова, А.В. (Исмайылова и др., 2022), Исмайыловой, И.Г., Раткович, Л.Д. (Исмайылова и др., 2023), Ахмедовой, Н.Р., Наумова, Н.Р. (Ахмедова и др., 2023), связанное с представлением о стохастической природе процессов формирования четырехчленного уравнения водного баланса речных бассейнов, включающего атмосферные осадки (AP_i), речной сток (RR_i), суммарное испарение (TE_i) и изменение бассейновых влагозапасов (BMR_i) в следующем виде $AP_i + \Delta BMR_i = RF_i + TE_i$, что предопределило вероятностное описание их во времени и пространстве, базирующееся на наблюдении их временных рядов и, стало новым подходом в определении трудно измеряемых элементов водного баланса, таких как суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов.

Эмпирическая гидрологическая модель на основе модульной сетки для решения практических вопросов, связанных с управлением водными ресурсами речных бассейнов, успешно применялась в типичных гидрологических условиях на территории Восточной Азии (Dadhwal et al., 2010; Bhattacharya et al., 2013; Jin et al., 2024; Han et al., 2024), Европы (Tzoraki et al., 2011; Panagopoulos et al., 2015; Marinou et al., 2017; Passaretti et al., 2022; Tolika et al., 2024; Estrada et al., 2024), Америки (Warszawski et al., 2013; Al-Lafta et al., 2013; Syed et al., 2014; Vanderkelen et al., 2018; Harding, 2024) и Африки (Alemaw, 2006; Querner et al., 2016; Belete et al., 2018), где параметры моделей сохранили свой физический смысл, а рассчитанные элементы водного баланса сопоставимы для использованных моделей.

На основе развития и углубления известной в гидрологии теории генетического стока, базирующейся на линейно-корреляционной модели с линейной связью слоя речного стока (RF_i) со слоем атмосферных осадков (AP_i), были проведены исследования Иофина, З.К. (2013). В этих исследованиях, на основе водно-балансовой концепции, было разработано линейно-корреляционное уравнение водного баланса, позволяющее оценить большое количество водно-балансовых параметров (10 параметров), в том числе, таких трудно определяемых, как суммарное испарение (TE_i), испарение с водной поверхности ($ETWS_i$), инфильтрация (IF_i), слой инфильтрационного питания ($IFNI_i$), влажность почвы (SM_i), запасы воды в почве (SWR_i), слой капиллярного поднятия (CRI_i) и слой внутрипочвенного стока (SDI_i). Совокупность этих параметров формирует потери атмосферных осадков (IAP_i), которые оцениваются с использованием метода наименьших прямоугольников.

Методы изучения развития гидрологических процессов, основанные на физическом анализе элементов водного баланса речных бассейнов и позволяющие глубже проникнуть во внутреннюю их структуру, показали, что все приведенные выше уравнения основываются на трехчленной зависимости водного баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение, речной сток), в рамках которых открывается возможность проанализировать и спрогнозировать динамику речного стока и элементов водного баланса речных бассейнов как функции атмосферных осадков во временных и пространственных аспектах.

Исходя из изложенного, следует отметить, что совершенствование естественно-научных представлений о теории водного баланса на водосборных территориях речных бассейнов на основе генетической теории стока, базирующейся на материалистической теории научного познания, где атмосферные осадки рассматриваются как важные средообразующие факторы, является актуальным направлением исследований в области гидрологии.

Цель исследования – оценка математических признаков и физического содержания линейно-корреляционного уравнения водного баланса речных бассейнов для получения прогнозных характеристик речного стока на предстоящий период в условиях климатических изменений.

Научная новизна заключается в создании гидрологической математической модели элементов водного баланса рек на примере бассейна реки Сарысу. Модель основана на разработке системы линейно-корреляционных уравнений, описывающих взаимосвязь стока с атмосферными осадками. Эта система позволяет получать ценную информацию об устойчивости, синхронности и цикличности водно-балансовых процессов, учитывая различные предположения о количественных и качественных характеристиках исследуемого явления.

Объект исследования. Водосборное пространство бассейна реки Сарысу относится к Нура-Сарысускому водохозяйственному бассейну, охватывающему южную часть Казахского мелкосопочника и пустыни Бетпақдала. Площадь водосбора составляет 136628,54 км², и этот регион тяготеет к Аральскому и Балхашскому бассейнам (рисунок 1).

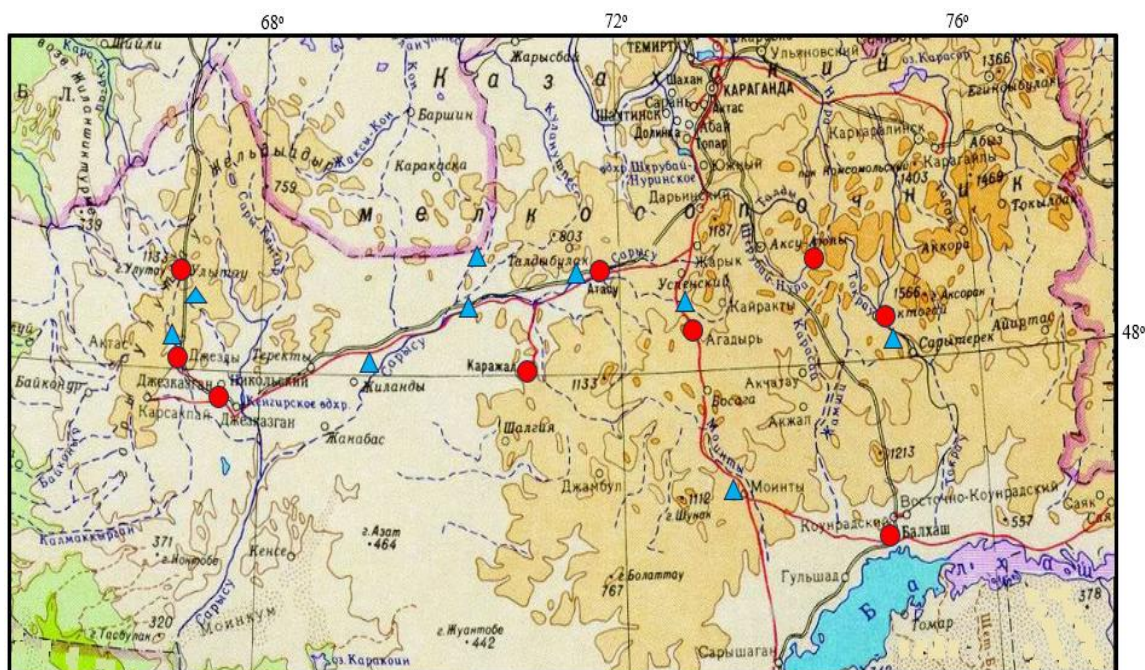


Рисунок 1. Схема расположения метеорологических станций (красная точка) и гидрологических постов (синий треугольник) в бассейне реки Сарысу

В центральной части мелкосопочника расположена горная система Бугулы (высшая точка - гора Буркитти, 1184 м), Жаксы-Тагылы, Космурын и Ортау (высшая точка - 1068 м), где формируются стоки рек Жаман-Сарысу и Жаксы-Сарысу. При их слиянии образуется река Сарысу, а ниже к ней присоединяются левобережные притоки Талды-Манака и Атасу. На западной части мелкосопочника возвышаются горы Улытау и Арғанаты, с восточных склонов которых формируются стоки рек Кара-Кенгир, Жыланды и Жезды. В восточной части мелкосопочника южного Казахского нагорья Бектау-Ата, Аксоран, Кызылтас и Кызылрай, где на высоте около 900 м берут начало реки Токрау и Мойынты. Площадь водосбора этих рек составляет соответственно 2920 км² и 953 км².

Все реки бассейна реки Сарысу имеют преимущественно снеговое питание, которое относится к казахстанскому типу, где почти весь сток приходится в период весеннего половодья, сменяющегося с продолжительной и низкой меженью в остальное время года.

На территории бассейна реки Сарысу расположены пять субъектов Республики Казахстан: Карагандинская, Жамбылская, Кызылординская, Актюбинская области и область Улытау, что определяет научную и практическую целесообразность статистического обоснования влияния климатических факторов на многолетние изменения стока бассейна реки Сарысу, выполняющего важные средообразующие и экологические функции.

2. Материалы и методы

В качестве информационно-аналитической базы по гидрологическому исследованию использованы среднегодовые расходы воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау и Мойынты, на основе материалов «Ресурсы поверхностных вод СССР» (Ресурсы поверхностных вод СССР, Центральный и Южный Казахстан. (1966)), «Государственный водный кадастр, Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод, Республики Казахстан» (1938-1989, 1989-2000, 2003-2023) с восстановлением пропущенных временных рядов за период 1940-2021 годы.

Базы исследований по климатическими показателями созданы на основе многолетних информационно-аналитических данных метеорологических станций Агадыр, Аксу-Аюлы, Актогай, Атасу и Улытау, расположенных в зоне формирования стока рек бассейна реки Сарысу, и базирующихся на архивных материалах РГП «Казгидромет», Справочника по климату СССР, Научно-прикладного справочника по климату СССР, Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) и справочно-информационного портала «Погода и климат», которые включают годы с различной природно-климатической обстановкой за период 1940-2021 годы (таблица 1).

Таблица 1. Основные гидрометеорологические характеристики рек водосбора бассейна реки Сарысу

Река	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м	Метеорологическая станция	Высота, м
Жаман-Сарысу	5210,0	773,0	Агадыр	694,0
Жаксы-Сарысу	570,0	637,0	Аксу-Аюлы	724,0
Атасу	2790,0	687,0	Агадыр	694,0
Кара-Кенгир	9860,0	567,0	Улытау	350,0
Жыланды	175,0	583,0	Улытау	350,0
Жезды	2410,0	518,0	Улытау	350,0
Токрау	2920,0	964,0	Актогай	780,0
Мойынты	953,0	834,0	Агадыр	694,0

При изучении структуры уравнения водного баланса речных бассейнов использованы методы математико-статистического анализа временных рядов гидрологических и климатических информаций, базирующихся на линейно-корреляционных уравнениях, характеризующих зависимости слоя речного стока от слоя атмосферных осадков. Для оценки значимости линейно-корреляционных уравнений водного баланса использован показатель эффективности Нэша-Сатклиффа, которой широко используется в мировой практике при гидрологическом моделировании и прогнозировании (Morigasi et al., 2007; Koch et al., 2013), и который равен индексу детерминации (R^2), выраженное квадратом линейного коэффициента корреляции ($R = \sqrt{R^2}$) (Потахова, 2015), для этого приняты критерии градации качества (Кадочникова и др., 2023) (таблица 2).

Таблица 2. Критерии градации качества для оценки значимости линейно-корреляционных уравнений водного баланса (шкала Чеддока)

Интерпретация	Критерии качества	
	индекс детерминации (R^2)	коэффициент корреляции (R)
Очень слабая	<0,29	<0,54
Слабая	0,30-0,41	0,55-0,64
Средняя	0,42-0,55	0,65-0,74
Сильная	0,56-0,70	0,75-0,84
Очень сильная	>0,71	>0,85

Слой речного стока (RRI_i , мм), как расчетная величина, представляющая отношение объема стока (VRF_i , км³) к площади водосбора (CA_i , км²) имеет следующий вид:

$$RRI_i = VRF_i \cdot 10^9 / CA_i \cdot 10^6 \rightarrow VRF_i \cdot 10^3 / CA_i \rightarrow VRF_i \cdot 10^3 \cdot 10^3 / CA_i, \quad (3)$$

где VRF_i - объем речного стока, км³: $VRF_i = 31526000 \cdot AAWC_i / 10^9 = 31,536 \cdot AAWC_i / 10^3$, км³; $AAWC_i$ - среднегодовой расход воды в речных бассейнах, м³/с; 31526000- количество секунда в годах; 10^9 - переводное число от км³ на м³; 10^6 - переводное число от км² на м²; 10^3 - переводное число от метра в миллиметр.

Для оценки циклических многолетних колебаний речного стока и определяющих их факторов на изучаемой территории использован метод построения разностных интегральных кривых с целью выявления их тенденции изменения и синхронности изучаемых процессов:

$$\begin{aligned} AMV_i &= (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n AAWC_i \rightarrow MC_i = AAWC_i / AMV_i \rightarrow \\ &\rightarrow (MC_i - 1) \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1) \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2 \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^3 \rightarrow \\ &\rightarrow CV_i = \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2] / (n - 1)\}^{1/2} \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1) / CV_i \rightarrow \\ &\rightarrow CA_i = \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^3] / (n - 1)\}^{1/2}; \\ SD_i &= AMV_i \cdot CV_i = AMV_i \cdot \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2] / (n - 1)\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где AMV_i - среднеарифметическое значение, определяемое в зависимости от числа лет гидрометрических и климатических наблюдений; $AAWC_i$ - среднегодовые или годовые значения, определяемые в зависимости от числа лет гидрометрических и климатических наблюдений; MC_i - модульный коэффициент рассматриваемой гидрологической и климатической характеристики; CV_i - коэффициент вариации; CA_i - коэффициент асимметрии; SD_i - среднее квадратическое отклонение.

Основное математическое свойство разностной интегральной кривой заключается в том, что отклонение модульного коэффициента (MC_i) за любой интервал времени (TI_i) от среднего значения (AMV_i) за рассматриваемый период наблюдений характеризуется тангенсом угла наклона линии (tga_i), соединяющей точки начала и конца интервала, к горизонтальной прямой, показывающий тенденцию и направленность этого процесса. Физические свойства их проявляются, когда интегральная кривая поднимается вверх относительно горизонтальной линии ($MC_i - 1$) > 1, и показывает многоводную фазу колебаний стока, а если кривая наклонена вниз ($MC_i - 1$) < 1, тогда соответствует маловодной фазе и между ними существует две точки пересечения ими горизонтальной прямой за рассматриваемый период равный ($MC_i - 1$) = 0, что показывает начало и конец полного цикла колебаний водности речного бассейна.

3. Результаты

По климатическим условиям территория водосбора бассейна реки Сарысу резко отличается большой континентальностью и низкой естественной увлажненностью, что объясняется её географическим положением внутри Евразийского материка и удаленностью от больших водных пространств. В связи с этим гидрологический режим рек на территории водосбора бассейна реки Сарысу определяется общим характером естественного увлажнения, который перекрывает влияние всех других факторов.

Ведущими климатическими факторами, определяющими гидрологический сток рек бассейна Сарысу, являются в основном осадки холодного и теплого периодов года, а также температура и влажность воздуха летом, характеризующие испаряющую способность природной системы. Совокупность этих факторов формирует механизм колебаний годового стока и определяет синхронность и цикличность водно-балансовых процессов.

Анализ цикличности многолетних колебаний речного стока рек и атмосферных осадков на территории водосбора бассейна реки Сарысу с использованием метода построения разностных интегральных кривых может рассматриваться как один из этапов изучения их интегральных и динамических характеристик с целью выявления тенденций и направлений изменения этого процесса (рисунок 2).

Как видно из рисунка 2, цикличность среднегодовых расходов воды рек на территории водосбора бассейна реки достаточно хорошо коррелируется с цикличностью годовых атмосферных осадков. В то же время некоторые противофазные явления, встречающиеся за рассматриваемый период, прежде всего обусловлены накапливаемым снежным покровом не только в холодный период текущего года, но и за предыдущий год, который является основным источником формирования стока.

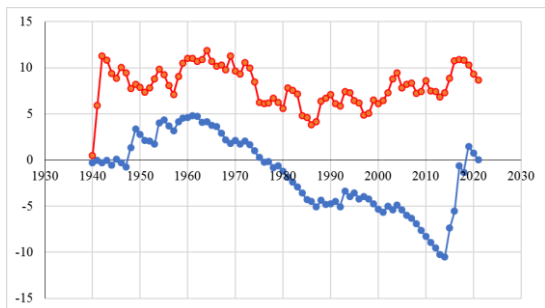
При этом выявленные изменения режима многолетних колебаний стока и осадков в бассейне реки Сарысу отражают физико-географические условия формирования речного стока в низкогорьях Казахского мелкосопочника, поскольку сила проявления ритмов в многолетних колебаниях неодинакова:

- в реках, берущих начало в горах Кызылтас, Бугулы, Жаксы-Тагылы, Космурын и Ортау, расположенных в центральной части низкогорья Казахского мелкосопочника Жаман-Сарысу, наблюдается синхронность между среднегодовым расходом воды и атмосферными осадками, для реки Жаксы-Сарысу асинхронность в 1950-2010 годы сменяется синхронностью, а для реки Атасу синхронность в 1940-1990 годы сменяется асинхронностью за рассматриваемый период;

- в реке Кара-Кенгир и его притоках Жыланды и Жезды, формирующихся в горах Улытау, расположенных в западной части низкогорья Казахского мелкосопочника, наблюдается асинхронность между среднегодовым расходом воды и атмосферными осадками, что обусловлено морфометрическими характеристиками, а также гидрогеологическими и климатическими условиями;

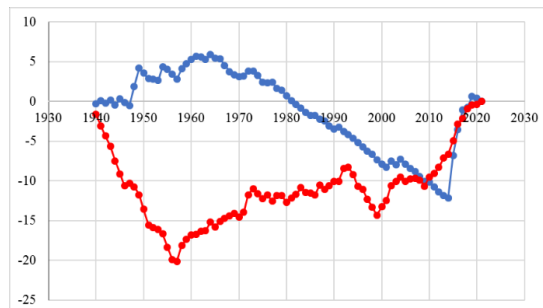
- в реке Токрау, формирующегося на северных склонах горы Аксоран, расположенного в восточной части низкогорья Казахского мелкосопочника и текущего в сторону озера Балхаш, наблюдается существенная асинхронность за рассматриваемый период, тогда как в реке Моинты синхронность за период 1940-1985 годы сменяется асинхронностью, обусловленной в основном ходом атмосферных осадков и в значительно меньшей степени температурным режимом.

Проявление синхронности или асинхронности в изменении среднегодового расхода воды рек и атмосферных осадков, как стокообразующий фактор, обусловлен безвозвратными потерями стока и атмосферных осадков в процессе водообразования.



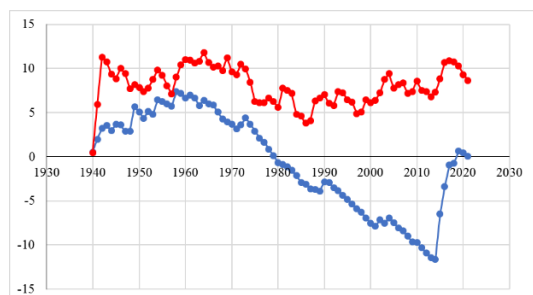
(а)

Река Жаман-Сарысу – м.с. Агадыр



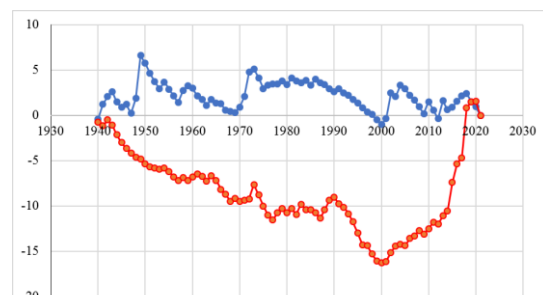
(б)

Река Жаксы-Сарысу – м.с. Аксу-Аюлы



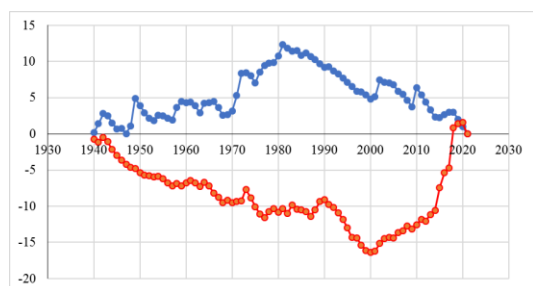
(в)

Река Атасу – м.с. Агадыр



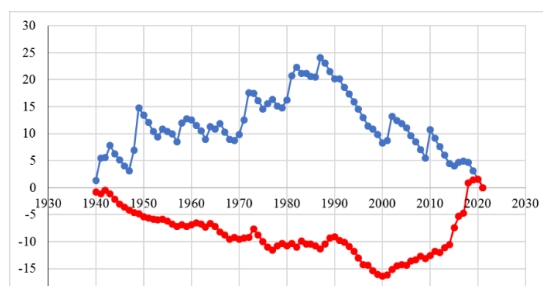
(г)

Река Кара-Кенгир – м.с. Улытау



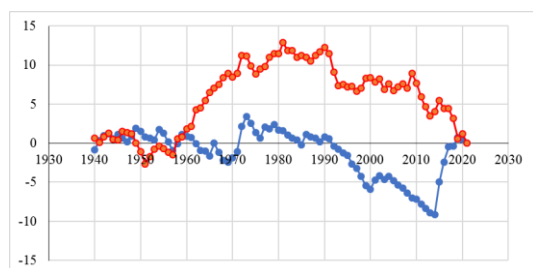
(д)

Река Жыланды – м.с. Улытау



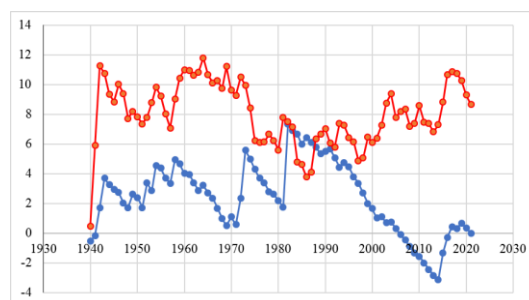
(е)

Река Жезды – м.с. Улытау



(ж)

Река Токрау – м.с. Актогай



(з)

Река Мойынты – м.с. Агадыр

Рисунок 2. Разностная интегральная кривая среднегодовых расходов воды рек (1- левая ордината) и сумм годовых осадков (2-правая ордината) на территории водосбора бассейна реки Сарысу: а - Река Жаман-Сарысу – м.с. Агадыр; б - Река Жаксы-Сарысу – м.с. Аксу-Аюлы; в - Река Атасу – м.с. Агадыр; г - Река Кара-Кенгир – м.с. Улытау; д - Река Жыланды – м.с. Улытау; е - Река Жезды – м.с. Улытау; ж - Река Токрау – м.с. Актогай; з - Река Мойынты – м.с. Агадыр.

На основе созданной базы данных по гидрологическому режиму рек и климатических показателей в водосборе бассейна реки Сарысу была проведена их статическая обработка с использованием стандартных пакетов Statistica и Excel, а пространственно-временный анализ гидрологических и климатических характеристик с помощью пакета ArcViewGis 3.2, в результате чего получены статистические параметры среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков, которые приведены в таблице 3.

Надежность и достоверность полученных статистических характеристик рек на территории водосбора бассейна реки Сарысу базируются, во-первых, на применении физически обоснованной модели многолетних колебаний стока, которая отражает суммарную изменчивость временного рядов среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков, во-вторых, на применении современных математических методов обработки с использованием цифровых технологий.

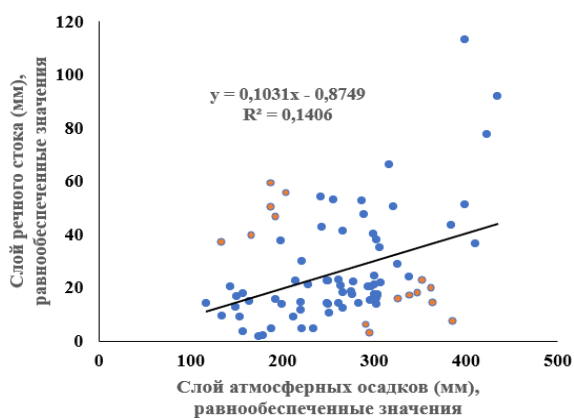
Таблица 3. Статистические параметры среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков в водосборе бассейна реки Сарысу

Наименование объекта	Статистические показатели			
	среднеарифметические (AMV_i)	коэффициент вариации (CV_i)	коэффициент асимметрии (CA_i)	среднеквадратические отклонения (SD_i)
Среднегодовой расход воды рек (m^3/c) в водосборе бассейна реки Сарысу				
Жаман-Сарысу	0,729	1,339	2,565	0,976
Жаксы-Сарысу	0,644	1,079	2,930	0,695
Атасу	0,5692	1,148	2,669	0,680
Кара-Кенгир	3,944	0,819	1,981	3,272
Жыланды	1,241	0,932	1,614	1,157
Жезды	0,500	1,219	1,745	0,610
Токрау	2,436	0,775	1,748	1,889
Мойынты	0,253	1,392	3,083	0,353

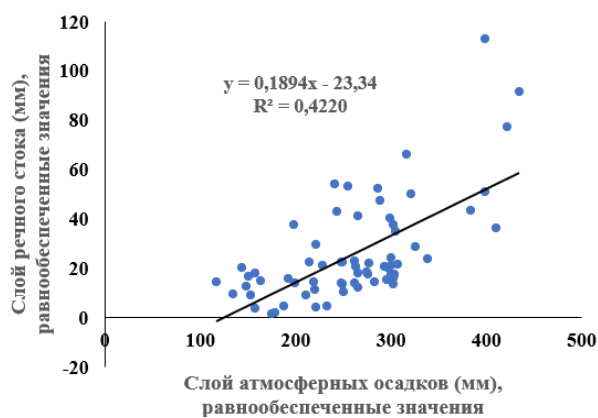
Годовые атмосферные осадки, мм				
Аксу-Аюлы	314,744	0,256	-0,114	80,786
Агадыр	216,000	0,221	0,105	47,675
Актогай	210,195	0,288	-0,137	60,527
Улытау	355,000	0,288	2,508	102,473

Анализ и оценка структуры временного ряда среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу показывает наличие случайных выбросов, то есть, резко выделяющихся наблюдений, вызванных какими-то исключительными гидрологическими и климатическими событиями. Для демонстрации эффекта равнообеспеченных значений среднегодовых расходов воды рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) бассейна реки Сарысу построены их графики, основанные на реальных временных рядах и с учетом отбрасывания наиболее отклоняющихся точек в процессе определения коэффициента корреляции линейных уравнений с использованием программы Microsoft Excel (рисунки 3-5).

Техника построения графиков зависимости слоя стока рек от атмосферных осадков на территории водосбора бассейна реки основывается на теории корреляции математической статистики, характеризующей тесноту корреляционных связей между этими двумя переменными. Рассмотрение таких связей представляет интерес с точки зрения обоснования принятия или отбраковки точек временных рядов. При этом, следует отметить, что слой атмосферных осадков измеряется более точно, чем слой стока речных бассейнов, что обусловлено физическими причинами. Именно такие точки при анализе графиков связи могут создавать значительный разброс и, возможно, незначительно снижать коэффициент корреляции (рисунки 3-5).

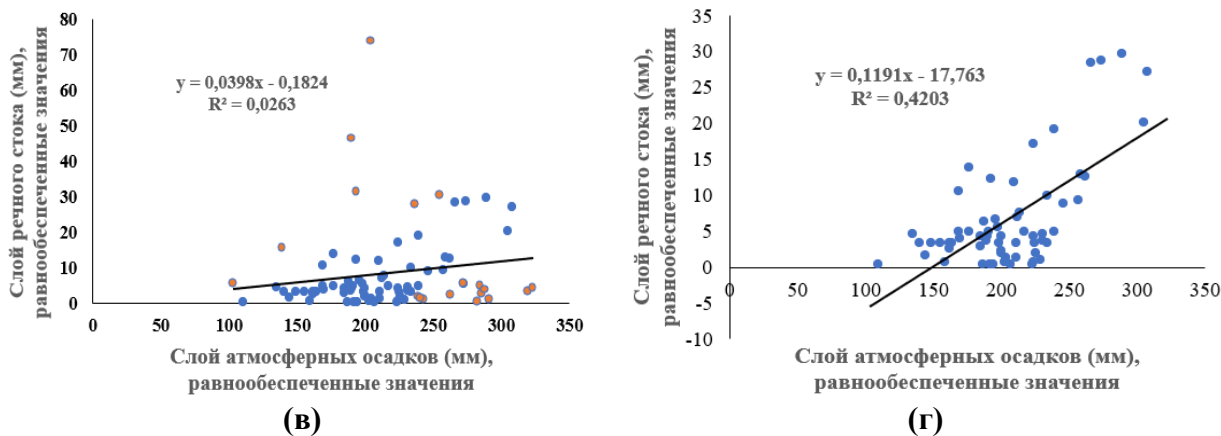


(а)



(б)

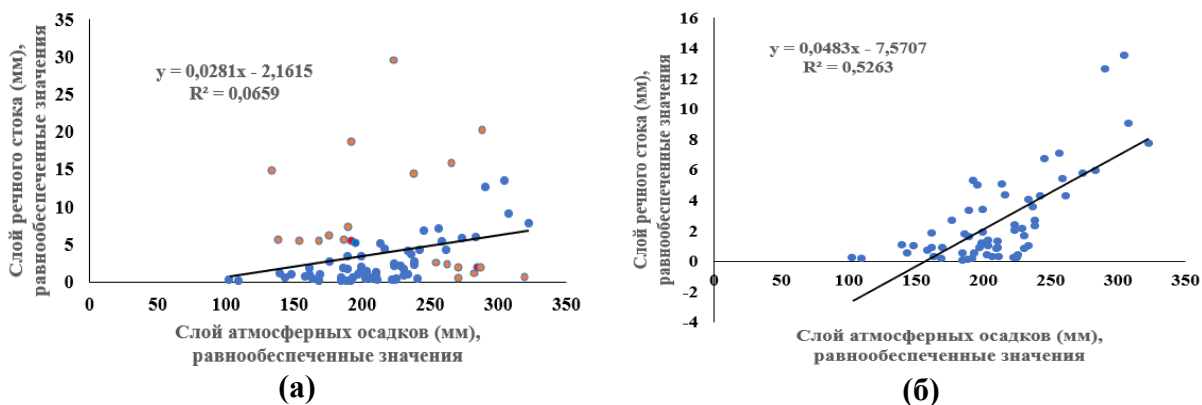
Река Токрау – метеорологическая станция Актогай



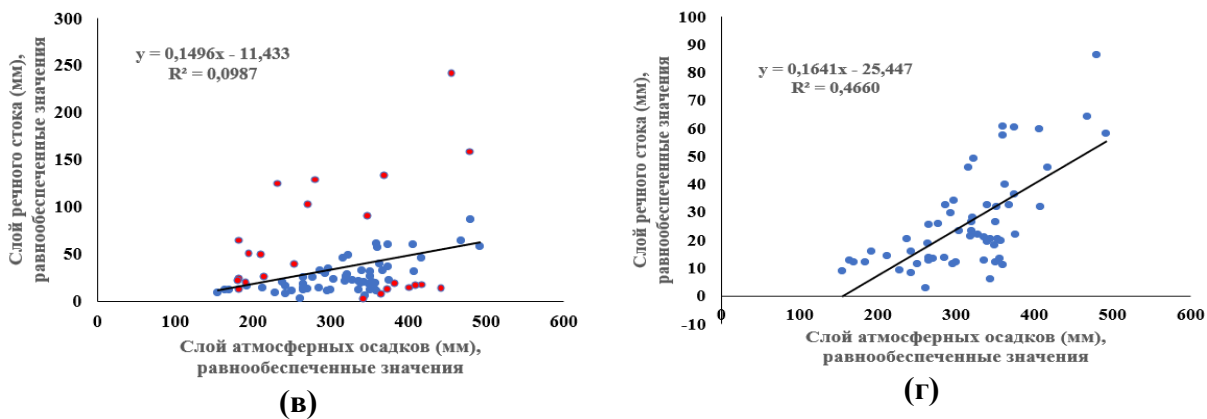
Река Мойынты – метеорологическая станция Агадыр

Рисунок 3. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейнов рек Токрау и Мойынты (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Токрау – метеорологическая станция Актогай; в, г - Река Мойынты – метеорологическая станция Агадыр.

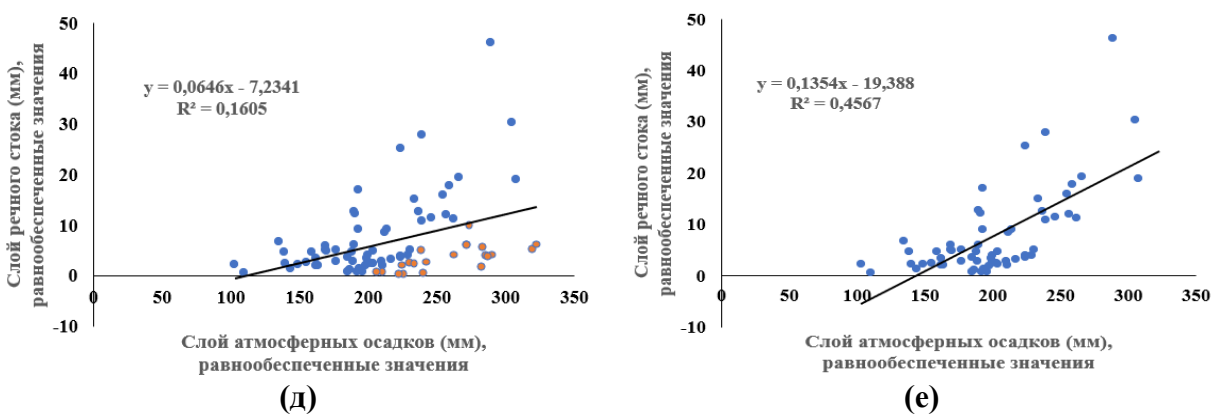
Данные по полученным уравнениям регрессии среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) в водосборе речных бассейнов Сарысу, их корреляционные параметры, а также результаты, полученные по линейно-корреляционной модели как функции среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i), приведены в таблице 4.



Река Жаман-Сарысу – метеорологическая станция Агадыр



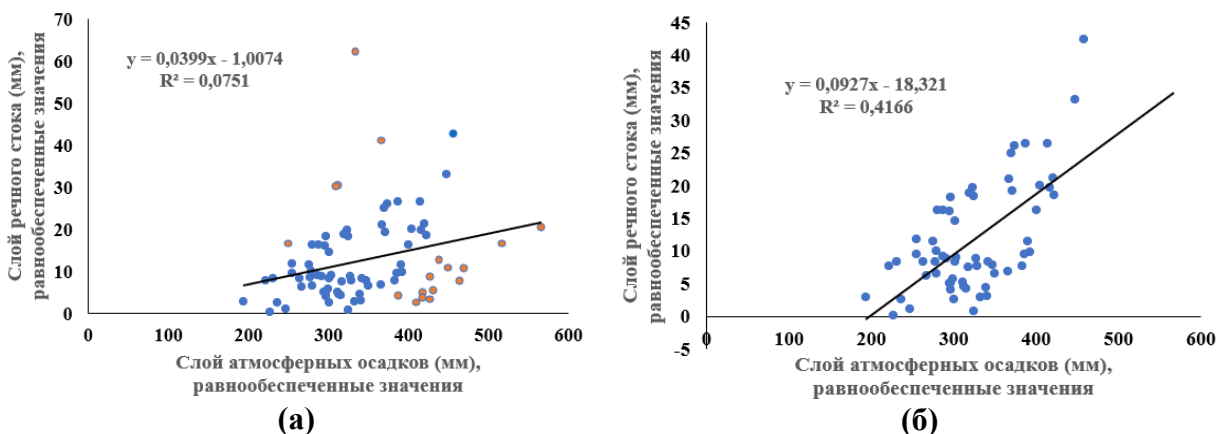
Река Жаксы-Сарысу – метеорологическая станция Аксу-Аюлы



Река Атасу – метеорологическая станция Агадыр

Рисунок 4. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейна реки Сарысу (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Жаман-Сарысу – метеорологическая станция Агадыр; в, г - Река Жаксы-Сарысу – метеорологическая станция Аксу-Аюлы; д, е - Река Атасу – метеорологическая станция Агадыр.

В силу различия в условиях формирования среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) в водосборе речных бассейнов, наблюдается ситуация, когда максимальному значению атмосферных осадков соответствует максимальное значение стока.



Река Кара-Кенгир – метеорологическая станция Улытау

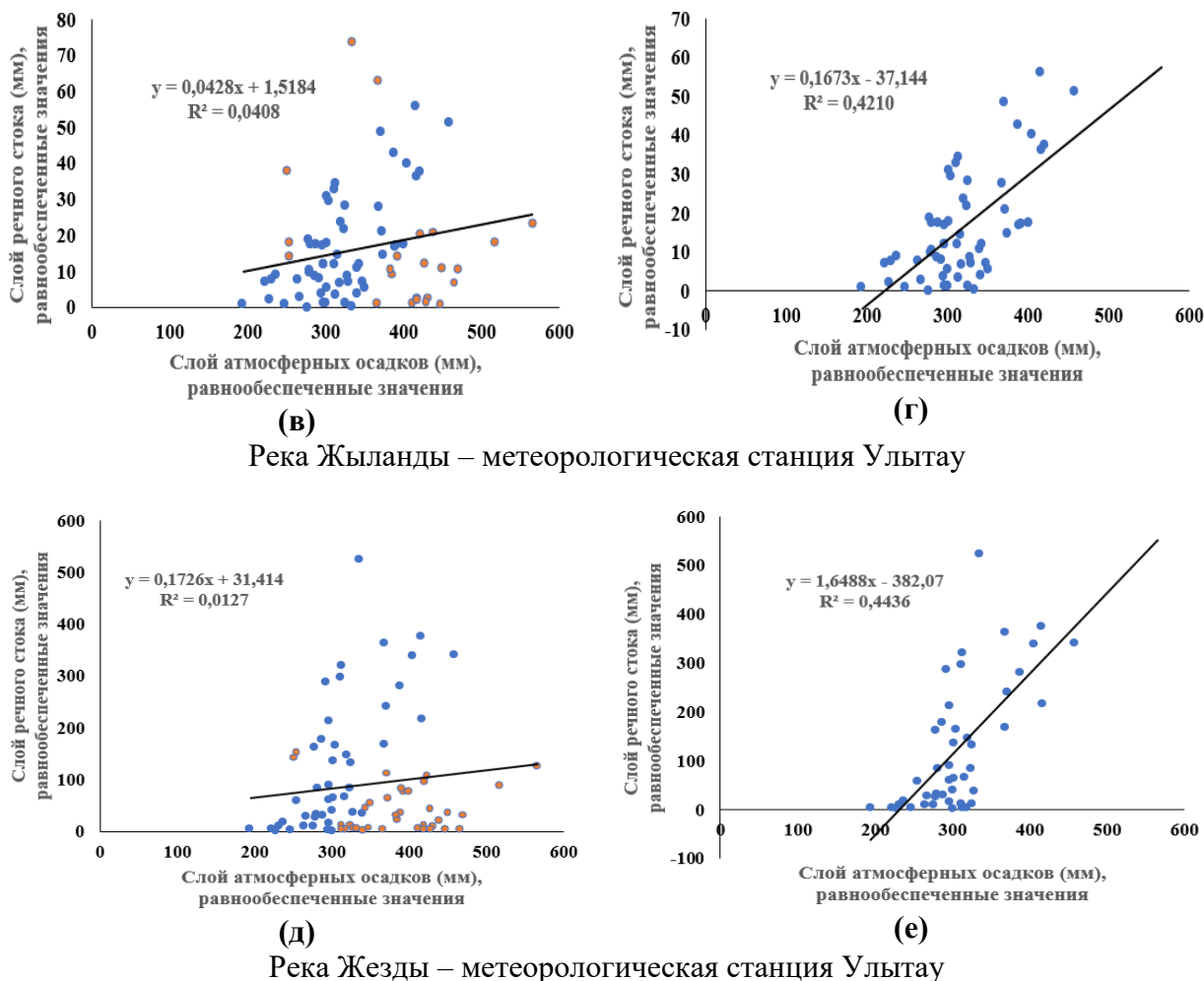


Рисунок 5. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейна реки Кара-Кенгир (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Кара-Кенгир – метеорологическая станция Улытау; в, г - Река Жыланды – метеорологическая станция Улытау; д, е - Река Жезды – метеорологическая станция Улытау.

При этом в нормативных документах СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик» указывается «...при отсутствии тесной связи необходимо на этом же графике нанести точки равнообеспеченных значений временных рядов обоих переменных...» (Рождественский и др., 1984), базирующихся на ранжировании временного ряда в убывающем порядке (рисунки 2-4), что обеспечивает достаточно высокий коэффициент корреляции, который использован при анализе и оценке математических и физических признаков зависимости слоя стока рек от слоя атмосферных осадков в водосборе бассейна реки Сарысу.

Анализ и оценка формирования поверхностных водных ресурсов, основанных на преобразовании атмосферных осадков (AP_i), выпадающих на водосбор, в речной сток (RF_i), отличающегося от величины атмосферных осадков величиной потерь при их трансформации ($CIAP_i$), выключающего суммарное испарение (TE_i) и изменение бассейновых влагозапасов (BWR_i) почвенного покрова, основываются на трехчленном уравнении водного баланса речных бассейнов:

$$RF_i = AP_i - CIAP_i = AP_i - (TE_i + BWR_i);$$

$$CIAP_i = 0, TE_i = 0; BWR_i = 0; PRF_i = AP_i, \tag{5}$$

где PRF_i - потенциально-возможный речной сток, при $CIAP_i = 0$; $TE_i = 0$; $BWR_i = 0$, равный слою годового атмосферного осадка (AP_i).

Таблица 4. Сведения о корреляционных параметрах уравнения водного баланса рек в водосборе реки Сарысу

Река пункт – наименование метеостанции	Вид ранжирования уравнения	Уравнение регрессии	Индекс детерминации (R^2)
Жаман-Сарысу-Агадыр	до	$RF_i = 0,0281 \cdot AP_i - 2,1615$	0,0659
	после	$RF_i = 0,0483 \cdot AP_i - 7,5707$	0,5263
Жаксы-Сарысу-Аксу-Аюлы	до	$RF_i = 0,1496 \cdot AP_i - 11,4330$	0,0987
	после	$RF_i = 0,1641 \cdot AP_i - 25,4470$	0,4460
Атасу- Агадыр	до	$RF_i = 0,0646 \cdot AP_i - 7,2341$	0,1605
	после	$RF_i = 0,1354 \cdot AP_i - 19,388$	0,4567
Кара-Кенгир-Улытау	до	$RF_i = 0,0399 \cdot AP_i - 1,0074$	0,0751
	после	$RF_i = 0,0927 \cdot AP_i - 18,3210$	0,4166
Жыланды - Улытау	до	$RF_i = 0,0428 \cdot AP_i + 1,5184$	0,0408
	после	$RF_i = 0,1673 \cdot AP_i - 37,1440$	0,4210
Жезды - Улытау	до	$RF_i = 0,1726 \cdot AP_i + 31,4140$	0,0127
	после	$RF_i = 1,6488 \cdot AP_i - 382,0700$	0,4436
Токрау - Актогай	до	$RF_i = 0,1031 \cdot AP_i - 0,8749$	0,1406
	после	$RF_i = 0,1894 \cdot AP_i - 23,3400$	0,4220
Мойынты - Агадыр	до	$RF_i = 0,0398 \cdot AP_i - 0,1824$	0,0263
	после	$RF_i = 0,1191 \cdot AP_i - 17,7630$	0,4203

При этом, согласно философскому подходу Иофина, З.К. (2013), линейно-корреляционная модель водного баланса, полученная в виде линейного корреляционного уравнения с использованием временных рядов годового стока (RF_i) и годовых атмосферных осадков (AP_i), является одной из разновидностью уравнения водного баланса: $RF_i = k \cdot AP_i - b$. Если, теоретически предположить, что коэффициент регрессии (k) в линейно-корреляционном уравнении равен единице, то есть слой выпадающих атмосферных осадков был бы равен слою речного стока, тогда линейно-корреляционное уравнение превращается в трехчленное уравнение водного баланса:

$$RR_i = AP_i - b \rightarrow b = CIAP_i \rightarrow CIAP_i = 0 \rightarrow PRF_i = AP_i. \tag{6}$$

Используя временные ряды годовых суммарных атмосферных осадков (AP_i) и годового стока (RF_i) Жаксы-Сарысу, обратимся к графическому изображению линейно-корреляционного уравнения, характеризующего зависимость речного стока (RF_i) от атмосферных осадков (AP_i), где можно выделить на нем генетические составляющие водного баланса речных бассейнов (рисунок 6).

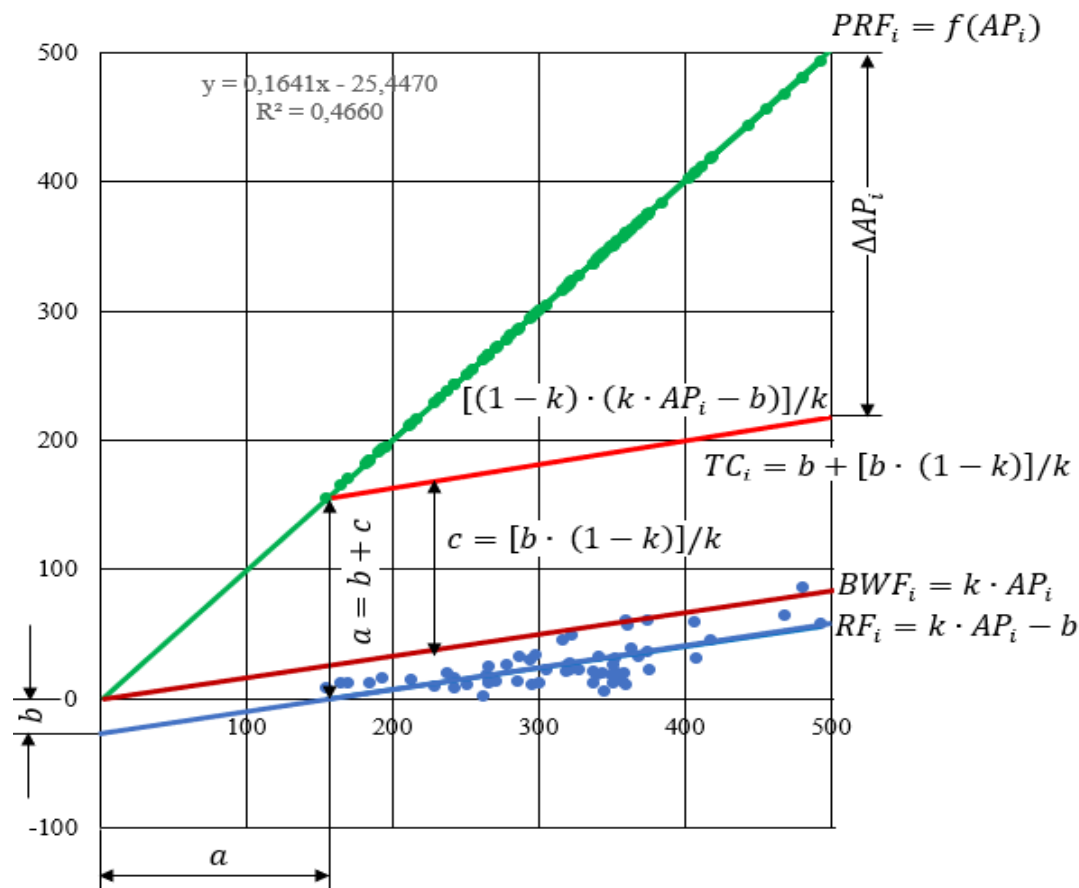


Рисунок 6. Графическое изображение элементов водного баланса реки Жаксы- Сарысу

При этом, слой речного стока (RF_i) в речных бассейнах появится, когда годовые атмосферные осадки (AP_i) будут больше суммарного испарения (TE_i), включающего испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i) и влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), то есть $AP_i > (E_i + BWR_i) \rightarrow AP_i > TE_i$. Следовательно, речной сток (RF_i) начинается с некоторым запаздыванием по отношению к началу атмосферных осадков до аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), тогда из уравнения водного баланса $RF_i = k \cdot AP_i - b$ следует, что параметр b может характеризовать аккумуляцию влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i).

При этом, отсекающаяся наклонная линия уравнения водного баланса $RF_i = k \cdot AP_i - b$ на оси абсцисс, на графике (рисунок 5) обозначим буквой α , тогда, во-первых, отношение b/α , представляет тангенс угла наклона $tg\alpha = b/\alpha$, равный коэффициенту регрессии уравнения (k) и, во-вторых, b является частью α , то есть $\alpha = b + c$, характеризующий влагозапасы почвенного покрова по испарению ($BWR_i = b = k \cdot \alpha$), формирующиеся в процессе водообразования атмосферных осадков (AP_i):

$$b = k \cdot AP_i - RF_i \rightarrow b = k \cdot \alpha \rightarrow k \cdot \alpha = k \cdot AP_i - RF_i; \quad (7)$$

$$\alpha = (k \cdot AP_i - RF_i)/k. \quad (8)$$

$$c = E_i = [(k \cdot AP_i - RF_i)/k] - b, \quad (9)$$

где $c = E_i$ - испарение атмосферных осадков в процессе водообразования; $\alpha = TE_i = E_i + BWR_i$ - суммарное испарение, включающее испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i) и влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i).

На основе графического изображения элементов водного баланса речных бассейнов введем дополнительное обозначение (рисунок б):

$$AP_i - k \cdot AP_i = d; \quad (10)$$

$$\alpha - b = c. \quad (11)$$

Определяем разницу $d - c$, на основе уравнения $AP_i - k \cdot AP_i$ и $(k \cdot AP_i - RF_i)/k$ и после несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} d - c &= AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b = AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot \alpha - \alpha = \\ &= AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot (k \cdot AP_i - RF_i)/k - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot AP_i - RF_i - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= AP_i - RF_i - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = (k \cdot AP - k \cdot RF_i - k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= (RF_i - k \cdot RF_i)/k = RF_i(1 - k)/k. \end{aligned} \quad (12)$$

Если $d - c$ равно $RF_i(1 - k)/k$, тогда $d - c = AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b &= RF_i(1 - k)/k \rightarrow \\ \rightarrow \alpha &= b + [AP_i - k \cdot AP_i - RF_i(1 - k)/k] \rightarrow \\ \rightarrow \alpha &= b + \{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\}. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом $\{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\}$ условно характеризует испарение атмосферных осадков в процессе водообразования, который после несложных преобразований примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\} &\rightarrow b + [(1 - k) \cdot (k \cdot AP_i - RF_i)]/k \rightarrow \\ &\rightarrow [b \cdot (1 - k)]/k; \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, уравнение (13) с учетом уравнения (14) примет следующий вид:

$$\alpha = b + [b \cdot (1 - k)]/k = b + c. \quad (15)$$

Таким образом, уравнение $\alpha = b + [b \cdot (1 - k)]/k = b + c$, характеризует суммарное испарение (TE_i), формирующееся из аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i).

На основе приведенного методологического подхода оценки элементов водного баланса речных бассейнов, основанного на линейно-корреляционном уравнении, которое характеризует зависимость среднегодовых слоев речного стока от атмосферных осадков (рисунки 5), можно сделать следующие выводы:

- $RF_i = k \cdot AP_i - b$, при $k = 1$ и $b = 0$, характеризует идеальные условия водного баланса, при которых $RF_i = AP_i$. В таких условиях слой речного стока может быть равен слою атмосферных осадков, выпадающих на водосборе, что соответствует потенциально возможному слою речного стока (PRF_i);

- $RF_i = k \cdot AP_i - b$, при $k \leq 1$ и наличии свободного члена, отражает изменение слоя речного стока в зависимости от слоя атмосферных осадков, выпадающих на водосборе, в реальных условиях;

- $b_i = k \cdot AP_i - RF_i$, является функцией влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), которые формируются в результате аккумуляции выпадающих на водосборе слоя атмосферных осадков. В условиях пограничной зоны пустынных и степных зон Центрального Казахстана, где годовые атмосферные осадки в 10-15 раз меньше, чем испаряемость, параметр b_i может быть принят за свободный член уравнения водного баланса речных бассейнов;

- $c = [b \cdot (1 - k)]/k$, где коэффициент регрессии в зависимости от слоя речного стока от годовых атмосферных осадков по математическим признакам и физической сущности, отражает испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), то есть $E_i = [b \cdot (1 - k)]/k$;

- $\alpha = b + c = b + [b \cdot (1 - k)]/k$, является суммарным испарением (TE_i), формирующимся из аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i);

- $\Delta AP_i = AP_i - (RF_i + BWR_i + E_i) = AP_i - [(k \cdot AP_i - b) + b + c] =$
 $= AP_i - (k \cdot AP_i - b + b + [b \cdot (1 - k)]/k) = AP_i - k \cdot AP_i - b \cdot (1 - k)/k =$

$$= AP_i \cdot (1 - k) - b \cdot (1 - k)/k = [k \cdot AP_i \cdot (1 - k) - b \cdot (1 - k)]/k =$$

$= [(1 - k) \cdot (k \cdot AP_i - b)]/k$ - совокупность паводкового стока, формирующегося в разнообразном сочетании природных (климатических, геоморфологических, почвенных, геологических) условий и являющимся значительной частью годового стока, который согласно генетической теории стока, включает подвешенный, подпертый и внутрипочвенный склоновый стоки, а также объем воды в замкнутых понижениях.

Таким образом, коэффициент регрессии линейно-корреляционного уравнения, характеризующий зависимость среднегодовых слоев речного стока от атмосферных осадков, позволяет определить элементы водного баланса речных бассейнов, включая слой речного стока, влагозапасы почвенного покрова по испарению, испарение атмосферных осадков в процессе водообразования и паводкового стока, формирующегося в результате аккумуляции атмосферных осадков на водосборной территории.

4. Обсуждение

Анализ и оценка различных видов гидрологических моделей, используемых для управления водными ресурсами в разных регионах мира, показали, что они основываются на генетической теории стока. Это позволяет определить множество водно-балансовых параметров с использованием линейно-корреляционной модели водного баланса, которая включает соответствующее уравнение.

Применяемые модели характеризуются весьма различными подходами к описанию гидрологических процессов в речном бассейне. При этом показано, что фундаментальным ядром разработанных гидрологических моделей является уравнение водного баланса, что позволяет совершенствовать их структурные элементы на основе научных представлений о механизмах формирования стока и материалистической теории научного познания.

При этом полученные параметры моделей и элементы водного баланса бассейна реки Сарысу с использованием методов наименьших прямоугольников (равнообеспеченных значений), удовлетворительно согласуются с общими концепциями формирования стока, которые в исследовательской перспективе могут пояснить использованные основные предположения (гипотезы), повысить обоснованность и сделать результаты более физически обоснованными.

5. Заключение

Ретроспективный анализ и оценка на основе использования многолетних данных о среднегодовом расходе воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау и Моинты, а также годовых атмосферных осадков метеорологических станций Агадыр, Аксу-Аюлы, Актогай, Атасу и Улытау, расположенных в зонах формирования стока рек бассейна реки Сарысу, позволили установить реакцию речных водосборов на выпадающие атмосферные осадки:

- анализ и оценка изменчивости и взаимосвязанности стока рек и атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием разностных интегральных кривых за рассматриваемый период 1940-2021 годы показали, что их конфигурация в целом носит синхронный характер и, в том числе, выявлены кратковременные циклы, свойственные отдельным фазам подъема и спада, которые могут рассматриваться как один из этапов изучения их интегральных и динамических характеристик с целью выявления тенденций и направленности изменений этого процесса;

- на основе созданной базы временных рядов гидрологического стока рек и атмосферных осадков в бассейне реки Сарысу с использованием теории равнообеспеченных величин переменных была получена система линейно-корреляционных уравнений, отражающих их функциональную зависимость от коэффициента регрессии. Эти уравнения позволяют смоделировать прогноз элементов водного баланса речных бассейнов на основе массива данных гидрометеорологических наблюдений;

- на основе системы линейно-корреляционного уравнения, характеризующего связь слоя гидрологического стока рек со слоем годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием методов наименьших прямоугольников (равнообеспеченных значений), была получена математическая модель потенциально-возможного слоя речного стока (PRF_i), слоя речного стока (RF_i), влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), испарения атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), суммарного испарения (TE_i) и паводкового стока (ΔAP_i). Эти модели позволяют провести анализ закономерностей сопряженных изменений элементов водного баланса, а в дальнейшем разработать имитационную модель речного бассейна.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, Ж.М. и Г.Ә.; методология, Ж.М.; программное обеспечение, К.М.; валидация, Г.Ә., К.А. и Н.Т.; формальный анализ, Г.С.; исследование, К.М.; ресурсы, К.А.; курирование данных, Н.Т.; написание - подготовка оригинального черновика, Ж.М.; написание - рецензирование и редактирование, Г.Ә.; визуализация, Г.С.; руководство, Г.Ә.; администрирование проекта, Г.Ә. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Мустафаев Жумахан Сулейменович – доктор технических наук, профессор, АО «Институт географии и водной безопасности», пр. Сейфуллина, 458/1, Алматы, Казахстан, 050000; z-mustafa@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2425-8148>

Адилбектеги Гульмира Адилбекқызы – кандидат географических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; adilbektegi_ga@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1521-0145>

Мустафаев Канат Жумаханович – кандидат экономических наук, MBA Finance Grenoble Business school, ТОО «GENC KZ CONSTRUCTION», ул. Клочкова, дом 89, кв. 33, Алматы, Казахстан, 050008; kmustafaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1480-3248>

Абдешев Куаныш Бакытжанович - доктор PhD, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауезова, проспект Тауке хан, 5, Шымкент, Казахстан, 160012; abdeshev.kuanysh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5326-1154>

Саспугаева Гулнур Ержановна - доктор PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; gulnur_erzhanovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3223-3602>

Турсынбаев Нуржан Аманжолович - доктор PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; nurANT_78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-5708>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности: отсутствуют.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akhmedova, N. R., & Naumov, N. R. (2023). Analiz ryadov godovykh summ atmosferykh osadkov meteostantsii Kaliningradskoi oblasti s uchetom korrektyrovki pokazanii osadkomerov [Analysis of Annual Atmospheric Precipitation Series at Kaliningrad Region Meteorological Stations with Adjustment of Precipitation Gauge Readings]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta, seriya biologiya. Nauka o zemle* [Bulletin of Udmurt University, Series Biology. Earth Sciences], 33(3), 299–231.
2. Alekseev, G. A. (1948). Dinamika infiltratsii dozhdevoi vody v pochvu [Dynamics of Rainwater Infiltration into Soil]. *Trudy GGI*, (6), 43–72.
3. Al-Lafta, H. S., Al-Tawash, B. S., & Al-Baldawi, B. A. (2013). Applying the «abcd» monthly water balance model for some regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications*, 25, 36–47.
4. Alemaw, B. F. (2006). A hybrid atmospheric and terrestrial water balance model: A GIS-based approach for large drainage basins. *Internal Research Report*, University of Botswana.
5. Befani, A. N. (1957). Puti geneticheskogo opredeleniya normy stoka [Methods of Genetic Determination of Runoff Norms]. *Nauchnyi ezhegodnik OGU* [Scientific Yearbook of OGU], 17–23.
6. Belete, M., Deng, J., Zhou, M., Wang, K., You, S., Hong, Y., & Weston, M. (2018). A new drought monitoring index for a humid region: Case study of Oklahoma in the southern United States. *Water*, 10(4), 473. <https://doi.org/10.3390/w10040473>
7. Bhattacharya, T., Aggarwal, S. P., & Garg, V. (2013). Estimation of water balance components of Chambal River basin using a macroscale hydrology model. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2), 1–7. ISSN 2250-3153.
8. Dadhwal, V. K., Aggarwal, S. P., & Mishra, N. (2010). Hydrological simulation of Mahanadi river basin and impact of land use/land cover change on surface runoff using a macro scale hydrological model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(7B), 165-170.
9. Estrada, L., Garcia, X., Saló-Grau, J., Marcé, R., Munné, A., & Acuña, V. (2024). Spatio-temporal patterns and trends of streamflow in water-scarce Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(24), 5353–5373. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5353-2024>
10. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr [State Water Cadastre]. (1938–1989). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod, Respubliki Kazakhstan* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters, Republic of Kazakhstan] (Vol. V, Iss. 4: Basseiny rek ozera Balkhash i bestochnykh raionov Tsentralnogo Kazakhstana [Basins of the

- Balkhash Lake Rivers and Closed Drainage Areas of Central Kazakhstan]). Obninsk: VNIIGMI-MCD.
11. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr [State Water Cadastre]. (1989–2000). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod, Respubliki Kazakhstan* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters, Republic of Kazakhstan] (Vol. V, Iss. 4: Basseiny rek ozera Balkhash i bestochnykh raionov Tsentralnogo Kazakhstana [Basins of the Balkhash Lake Rivers and Closed Drainage Areas of Central Kazakhstan]). Almaty.
 12. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr Respubliki Kazakhstan [State Water Cadastre of the Republic of Kazakhstan]. (2003–2023). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod rek i kanalov* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters of Rivers and Canals] (Part 1, Iss. 8: Basseiny rek Nura i Sarysu [Basins of the Nura and Sarysu Rivers]). Almaty.
 13. Harding, B. L. (2024). Annual water balance model of the upper Colorado River basin. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5044547>
 14. Han, X., Zhu, Y., Wang, X., Wang, Y., Shen, T., & Tang, R. (2024). A coupled regional-scale numerical model for hydrological processes and interactions between groundwater and surface water in a controlled drainage district. *Journal of Hydrology*, 643, 132036. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132036>
 15. Iofin, Z. K. (2013). Lineino-korrelyatsionnaya model vodnogo balansa [Linear-Correlation Model of Water Balance]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* [Journal of the University of Water Communications], (II(XVIII)), 20–32.
 16. Ismayylov, G. Kh., & Fedorov, V. M. (2011). Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti izmenchivosti godovogo vodnogo balansa reki Volga [Spatiotemporal Patterns of Annual Water Balance Variability in the Volga River]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental Engineering], 2, 57–63.
 17. Ismayylova, I. G., & Ratkovich, L. D. (2023). Formirovanie vremennykh ryadov gidrometeorologicheskoi informatsii dlya otsenki izmenchivosti elementov vodnogo balansa [Formation of Hydrometeorological Time Series for Assessing Water Balance Variability]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Hydrotechnical Construction], 11, 20–26.
 18. Ismayylova, I. G., Ismayylov, G. Kh., Murashchenkova, N. V., & Perminov, A. V. (2022). Obosnovanie razvitiya gidrologicheskikh protsessov s ispolzovaniem dinamiko-stokhasticheskogo protsessa [Substantiation of Hydrological Process Development Using Dynamic-Stochastic Modeling]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental Engineering], 5, 74–82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-5-74-82>
 19. Jin, L., Chen, S., Yang, H., & Zhang, C. (2024). Evaluation and drivers of four evapotranspiration products in the Yellow River Basin. *Remote Sensing*, 16(11), 1829. <https://doi.org/10.3390/rs16111829>
 20. Kadochnikova, E. I., & Varlamova, Yu. A. (2023). *Statisticheskii analiz prostranstvennykh dannykh: uchebnoe posobie* [Statistical Analysis of Spatial Data: A Textbook]. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo universiteta [Kazan University Publishing House].
 21. Keller, R. (1965). *Vody i vodnyi balans sushy* [Water and the Water Balance of Land]. Moscow: Progress.
 22. Koch, M., & Cherie, N. (2013). SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia. In *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research* (pp. 428–523). Koblenz, Germany.
 23. Koronkevich, N. I., & Zaitseva, I. S. (2005). Polistrukturnyi analiz vodnogo balansa i vodnykh resursov v basseine Volgi [Multi-Structural Analysis of Water Balance and Water Resources in the Volga Basin]. *Ukrainskii geograficheskii zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], (2), 17–22.

24. Kudelin, B. I. (1960). *Printsipy regionalnoi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of Regional Assessment of Natural Groundwater Resources]. Moscow: Izdatelstvo MGU [Moscow State University Press].
- 25 Lvovich, M. I. (1974). *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* [Global Water Resources and Their Future]. Moscow: Mysl [Thought Publishing House].
26. Marinou, P. G., Feloni, E. G., Tzoraki, O., & Baltas, E. A. (2017). An implementation of a water balance model in the Evrotas basin. *European Water*, 57, 147–154.
27. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
28. Oldekop, E. M. (1911). *Isparenie s poverkhnosti rechnykh basseinov* [Evaporation from River Basin Surfaces]. Yuryev.
29. Oppokov, E. V. (1935). Osadki, stok i isparenie v basseine Dnepra vyshe Kieva [Precipitation, Runoff, and Evaporation in the Dnieper Basin Above Kiev]. V *Issledovanie rek SSSR* [In Study of the Rivers of the USSR] (Iss. 7, pp. 38–54).
30. Panagopoulos, A., Arampatzis, G., Kuhr, P., Kunkel, R., Tziritis, E., & Wendland, F. (2015). Area-differentiated modeling of water balance in Pinios River basin, Central Greece. *Global NEST Journal*, 17(2), 221–235.
31. Passaretti, S., Mineo, C., Varriale, A., & Cosentino, C. (2022). A technical note on the application of a water budget model at regional scale: A water manager’s approach towards a sustainable water resources management. *Water*, 14(5), 712. <https://doi.org/10.3390/w14050712>
32. Potakhova, I. V. (2015). *Ekonometrika: uchebnoe posobie* [Econometrics: A Textbook]. Tomsk: Fakultet distantsionnogo obucheniya TUSURa [TUSUR Distance Learning Faculty].
33. Querner, E. P., Froebrich, J., Gallart, F., Prat, N., Cazemier, M., & Tzoraki, O. (2016). Simulating stream flow variability in temporary streams using a coupled groundwater-surface water model. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 146–161.
34. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface Water Resources of the USSR]. (1966). *Tsentralnyi i Yuzhnyi Kazakhstan. Karagandinskaya oblast* [Central and Southern Kazakhstan. Karaganda Region] (Vol. 13, Iss. 1). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].
35. Rozhdestvensky, A. V., & Lobanov, A. G. (1984). *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Guide for Determining Calculated Hydrological Characteristics]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].
36. Syed, T. H., Webster, P. J., & Famiglietti, J. S. (2014). Assessing variability of evapotranspiration over the Ganga River basin using water balance computations. *Water Resources Research*, 50(4), 2551–2565.
37. Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Traboulsi, M., Zaharia, L., Constantin, D. M., Tegoulis, I., & Maheras, P. (2024). Comparative study of the frequencies of atmospheric circulation types at different geopotential levels and their relationship with precipitation in Southern Romania. *Atmosphere*, 15(9), 027. <https://doi.org/10.3390/atmos15091027>
38. Tzoraki, O., Papadoulakis, V., Christodoulou, A., Vozinaki, E., Karalemas, N., Gamvroudis, C., & Nikolaidis, N. P. (2011). Hydrologic modelling of a complex hydrogeologic basin: Evrotas River Basin. In *Advances in the Research of Aquatic Environment* (pp. 179–186). Springer Berlin Heidelberg.
39. Vanderkelen, I., van Lipzig, N. P. M., & Thiery, W. (2018). Modelling the water balance of Lake Victoria (East Africa) - Part 1: Observational analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(22), 5509–5525. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5509-2018>
40. Velikanov, M. A. (1948). *Gidrologiya sushi* [Land Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].

41. Voeikov, A. I. (1949). *Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii* [Climates of the Globe, Especially Russia]. V *Izbrannye sochineniya* [In Selected Works] (Vol. 1). Moscow-Leningrad.
42. Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O., & Schewe, J. (2013). The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3228–3232. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110>

Гидрологиялық және климаттық бақылау деректері негізінде Сарысу өзені бассейнінің су балансының элементтерін модельдеу

Жұмахан Мұстафаев, Гүлмира Әділбектегі, Қанат Мұстафаев, Қуаныш Әбдешев, Гүлнур Саспугаева, Нұржан Тұрсынбаев

Андатпа: Сарысу өзені бассейнінің ағынын қалыптастыру аймағындағы өзен суларын талдау және бағалау үшін салыстырмалы түрде біркелкі орналасқан Ақсу-Аюлы, Ағадыр, Ақтоғай және Ұлытау метеорологиялық станцияларының жылдық жауын-шашыны бойынша ақпаратты пайдалана отырып, Жамансарысу, Жақсы-Сарысу, Атасу, Қара-Кеңгір, Жыланды, Жезді, Қазақ ұсақ шоқыларының аласа тауларының шегінде 1940-2021 жылдар аралығындағы бақылау кезеңінде тоқырау өзендерінің орташа жылдық су шығыстары пайдаланылды. Сарысу өзені бассейнінің гидрологиялық ағынының және жылдық атмосфералық жауын-шашынның жеткілікті ұзақ уақыт қатарларына негізделген талдау және бағалау дифференциалды интегралдық қисықтар әдістерін қолдана отырып, су жинағыштардың жауын-шашынға реакциясының алуан түрлілігіне байланысты циклдік тербелістердің болуын көрсетеді. Олар синхронды сипатта болады және, соның ішінде, көтерілу мен құлдыраудың жекелеген фазаларына тән қысқа мерзімді циклдар анықталды. Гидрологиялық ағынның Сарысу өзені бассейнінің су жинауында түсетін атмосфералық жауын-шашынға тәуелділігін сипаттайтын өзендердің су балансының сызықтық-корреляциялық теңдеуінің параметрлерін статистикалық негізделген бағалау су балансы элементтерінің математикалық модельдерін әзірлеу үшін ғылыми негіз болып табылады. Бұл модельдерге өзен ағынының ықтимал қабаты, булану арқылы жер жамылғысының ылғал қоры, су түзілу процесінде жауын-шашынның булануы, жалпы булану және регрессия коэффициентінің математикалық және физикалық сипаттамаларына негізделген су тасқыны жатады.

Түйін сөздер: су балансының теңдеуі, сызықтық-корреляциялық теңдеу, өзен ағыны, жауын-шашын, регрессия коэффициенті, жалпы булану, жер жамылғысының ылғал қоры.

Modelling of water balance elements in the Sarysu River basin based on hydrological and climatic observation data

Zhumakhan Mustafayev, Gulmira Adilbektegi, Kanat Mustafayev, Kuanysh Abdeshev, Gulnur Saspugayeva, Nurzhan Tursynbayev

Abstract: To analyse and assess water resources in the runoff formation zone of the Sarysu River basin, data on average annual water discharge of the rivers Zhaman-Sarysu, Zhaksy-Sarysu, Atasu, Kara-Kengir, Zhylandy, Zhezdy, and Tokrau were used, as well as information on annual precipitation recorded at meteorological stations Aksu-Ayuly, Agadyr, Aktogay and Ulytau, relatively evenly located within the low mountains of the Kazakh shallow zone, for the period of observations from 1940 to 2021. Analysis and assessment on the basis of sufficiently long time series of hydrological river runoff and annual precipitation of the Sarysu River basin using the methods of difference integral curves show the presence of cyclic fluctuations due to the diversity of catchment response to precipitation, which are synchronous in nature, including short-term cycles characteristic of separate phases of rise and fall. Statistically substantiated estimation of parameters of the linear-correlation equation of the river water balance, which characterises the dependence of hydrological runoff on precipitation falling in the catchment of the Sarysu River basin, serves as a scientific basis for the development of mathematical models of water balance elements. These models include potential-possible layer of river runoff, soil moisture reserves by evaporation, evaporation of atmospheric precipitation in the process of water formation, total evaporation and flood runoff based on mathematical and physical characteristics of the regression coefficient.

Keywords: water balance equation, linear-correlation equation, river runoff, precipitation, regression coefficient, evapotranspiration, soil moisture reserves.

Экологическая осознанность как ключевой аспект образовательного потенциала интерактивных симуляторов

Павел Дмитриев¹, Кристина Каримова^{1*}

¹Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; dmitriev_pavel@mail.ru, svvxnxxt@bk.ru

*Корреспонденция: svvxnxxt@bk.ru

Аннотация: В статье представлен анализ апробации разработанного экологического симулятора принятия решений, направленного на формирование экологической осознанности обучающихся и развития их аналитических способностей. Актуальность исследования обусловлена необходимостью внедрения интерактивных цифровых технологий в образовательный процесс для повышения качества обучения, развития навыков устойчивого управления природными ресурсами и принятия обоснованных экологических решений. В ходе исследования использован метод анкетирования с применением Google Forms, что позволило провести объективную и комплексную оценку вовлеченности пользователей, удобства интерфейса, образовательной ценности и реалистичности сценариев симулятора. Результаты апробации показали, что большинство респондентов положительно восприняли симулятор, отметив его интерактивность, информативность, практическую значимость и удобство применения в учебной деятельности. В то же время выявлены аспекты, требующие доработки, включая оптимизацию интерфейса, расширение сценариев и усовершенствование механизма обратной связи. Полученные данные подтверждают перспективность использования интерактивных цифровых инструментов в экологическом образовании. Дальнейшее совершенствование симулятора, его адаптация под различные образовательные уровни и интеграция в учебные программы позволят значительно повысить уровень экологической грамотности, развить критическое мышление, сформировать устойчивые модели поведения и способствовать формированию навыков системного анализа, прогнозирования и принятия устойчивых решений в реальных экологических ситуациях. Кроме того, расширение функционала симулятора может повысить мотивацию обучающихся и способствовать глубокому усвоению знаний. В перспективе использование подобных цифровых инструментов может стать важным шагом к модернизации образовательных подходов.

Цитирование: Дмитриев, П., Каримова, К. (2025). Экологическая осознанность как ключевой аспект образовательного потенциала интерактивных симуляторов. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 152-170.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-152-170>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 24.02.2025
Исправлена: 01.03.2025
Принята: 10.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Ключевые слова: экология, устойчивость, экологическое образование, информационно-коммуникационные технологии, интерактивный симулятор, экологическая осознанность, цифровые

образовательные инструменты.

1. Введение

Современные экологические вызовы требуют новых подходов к образованию, направленных на развитие экологической осознанности и ответственности у всех участников общества. Взаимодействие человека с окружающей средой должно основываться на принципах устойчивого развития, что невозможно без глубокой экологической культуры. Экологическое образование играет ключевую роль в формировании знаний о состоянии окружающей среды, осознании последствий деятельности человека и поиске эффективных решений экологических проблем (Zhang et al., 2025; Scheel et al., 2024).

Информационно-коммуникационные технологии в последние десятилетия стали неотъемлемой частью образовательного процесса (Chia et al., 2025; Kondratenko et al., 2024). Их применение в экологическом образовании открывает новые возможности для моделирования сложных процессов, анализа взаимосвязей и обучения через практические примеры (Barna et al., 2020; Nazlidou et al., 2024). Интерактивные инструменты, такие как симуляторы, позволяют не только передавать знания, но и формировать навыки принятия решений, учитывающих экологические последствия (Kornilov et al., 2017). Также интересен подход их использования с проблемами окружающей среды, а также они содействуют устойчивому развитию (Hussain et al., 2025).

Исследования, посвященные применению информационно-коммуникационных технологий в экологическом образовании, свидетельствуют о растущем интересе к использованию цифровых инструментов для формирования экологической культуры. Значительный вклад в развитие этой области внесли такие авторы, как Байханов, И.Б., Сорокопуд, Ю.В., Коломиец, О.М., Канюк, А.С., Соколова, Н.И. Они подчеркивают важность интерактивных методов обучения, которые способствуют формированию экологического сознания, развитию аналитического мышления и навыков принятия решений (Adieva et al., 2024).

Симонова, И.Н. в своих исследованиях отмечает, что, несмотря на кажущуюся экологическую нейтральность IT-сферы, её влияние на окружающую среду далеко не однозначно. Она подчеркивает, что информационная среда как рукотворная система создает новые вызовы для экологической культуры, требуя переосмысления образовательных подходов. Информационно-коммуникационная образовательная среда, по мнению автора, должна проектироваться таким образом, чтобы не только способствовать познавательной активности обучающихся, но и формировать их экологическую культуру через дидактические возможности цифровых технологий (Simonova, 2013).

Однако анализ научной литературы показывает, что применение интерактивных технологий в экологическом образовании остается недостаточно исследованным. В частности, использование симуляторов для обучения навыкам принятия экологически значимых решений редко становится предметом глубоких исследований. Это создает проблемную ситуацию, связанную с необходимостью разработки и апробации новых подходов, способных повысить эффективность экологического образования (Mar et al., 2025).

В данной работе основное внимание уделяется созданию и апробации интерактивного симулятора, направленного на обучение экологически обоснованным решениям. Применение интерактивных симуляторов в образовательном процессе активно изучается в научных исследованиях (Ni et al., 2024). Данный подход используется при проектировании (AI-Saigh et al., 2023). Так, Emprin, F. и Sabra, H. разработали методологию использования симулятора, который представляет собой тренажер по анализу урока геометрии (Galiakberova et al., 2020). Интерактивные технологии применяются и в области филологии, обучения языкам (He et al., 2024). Эти технологии являются неотъемлемой частью современного образовательного процесса (Abumosa et al., 2024; Sibley et al., 2024).

Кроме того, А.С. Мисникова рассматривает применение симуляторов и игровых технологий в образовании, подчеркивая их роль в развитии когнитивных способностей, критического мышления и адаптивных учебных программ (Misnikova, 2024).

Симулятор ориентирован на моделирование сложных ситуаций, связанных с управлением природными ресурсами и минимизацией антропогенного воздействия, что позволяет обучающимся не только осваивать теоретические знания, но и применять их на практике (Bin et al., 2025; Yaseen et al., 2025). Цель исследования заключается в оценке эффективности применения такого симулятора в образовательной практике, а также в анализе его влияния на развитие экологического мышления и осознанности обучающихся.

Таким образом, актуальность данного исследования определяется необходимостью разработки инновационных инструментов обучения, способных повысить эффективность экологического образования и сформировать у обучающихся навыки, востребованные в условиях глобальных экологических вызовов.

В исследование включены следующие задачи: разработка интерактивного симулятора для моделирования решений экологических проблем на базе интернет-ресурса; проведение апробации разработанного симулятора среди студентов для оценки его эффективности в процессе формирования экологического мышления; анализ полученных результатов.

Разработка симулятора базировалась на нескольких ключевых критериях. Научная обоснованность обеспечивалась использованием достоверных экологических данных, моделей и принципов устойчивого развития. Интерактивность позволяла пользователям принимать решения, влияющие на развитие сценария, что способствовало вовлечению и развитию аналитических навыков. Доступность интерфейса учитывала потребности различных категорий пользователей, обеспечивая простоту взаимодействия с ресурсом. Разнообразие сценариев охватывало ключевые экологические проблемы, способствуя комплексному изучению предмета. Обратная связь помогала осознавать последствия решений, формируя экологическое мышление. Гибкость платформы обеспечивала возможность расширения функционала и интеграции новых сценариев. Эти параметры обеспечили соответствие симулятора современным требованиям к образовательным инструментам.

2. Материалы и методы

В условиях нарастающих экологических вызовов и необходимости формирования устойчивого мышления среди обучающихся особую значимость приобретает использование инновационных образовательных технологий (Yul'metova et al., 2020).

В этом контексте, разработан симулятор решений экологических проблем на базе интернет-ресурса. Данный интерактивный инструмент представляет собой образовательную платформу, которая позволяет воспроизводить реальные экологические ситуации и анализировать последствия различных управленческих решений. Основная цель разработки заключается в формировании у пользователей системного понимания концепций устойчивого развития и демонстрации влияния индивидуальных и коллективных решений на состояние окружающей среды. Такой подход делает образовательный процесс более увлекательным и интерактивным, способствуя более глубокому усвоению знаний и формированию экологической осознанности (Wu et al., 2018; Guana-Moya et al., 2024).

На главной странице пользователи встречают приветственное сообщение и краткое описание симулятора. Далее, нажав кнопку «Начать сейчас», они переходят к выбору направления для исследования: управление отходами либо управление ресурсами. Каждое направление имеет свой сюжетный квест - образовательный сценарий, который включает в себя этапы принятия решений, небольшие квизы и анализ последствий. Начальный этап прохождения симулятора представлен на рисунке 1.

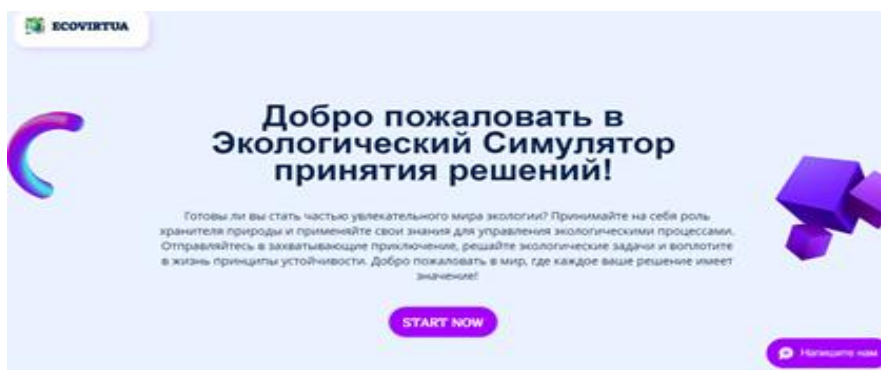


Рисунок 1. Главная страница

Сюжетный квест - это интерактивная обучающая история, где пользователю предлагается принять участие в сценарии, основанном на реальных экологических проблемах. Ключевой особенностью квеста является возможность влиять на развитие событий путем выбора различных решений, что позволяет моделировать реальные экологические процессы и оценивать их последствия. Это делает симулятор не только эффективным обучающим инструментом, но и средством для исследования поведения пользователей, анализа их стратегий и выявления наиболее оптимальных подходов к решению экологических задач. Кроме того, данный формат обучения способствует развитию критического мышления, навыков прогнозирования и комплексного подхода к оценке экологических ситуаций (Galiakberova et al., 2020; McGuire et al., 2022).

Рисунок 2 иллюстрирует следующий этап - знакомство пользователей с кратким дайджестом выбранного сценария. На этом этапе обучающиеся получают описание задачи, которое задает контекст для дальнейшего прохождения квеста, помогая сформировать начальное представление о проблеме. Четкое понимание исходной ситуации позволяет пользователям осознанно принимать дальнейшие решения и видеть их долгосрочные последствия. Это способствует не только более глубокому усвоению материала, но и формированию экологической ответственности, поскольку участники учатся оценивать влияние своих действий на окружающую среду.

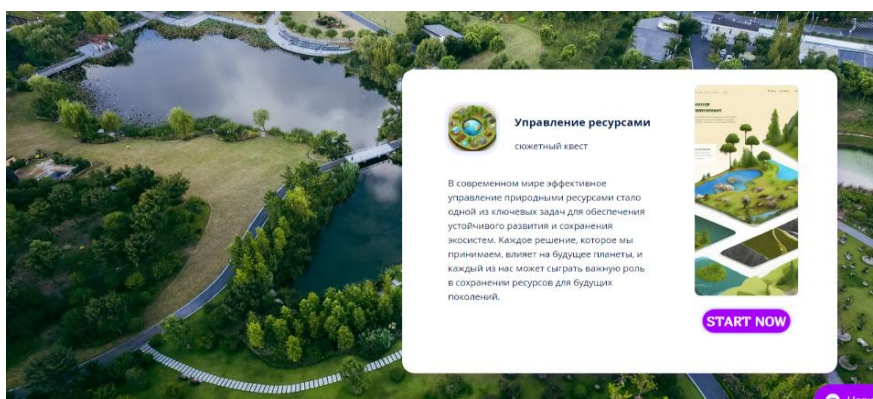


Рисунок 2. Сюжетный квест

Далее начинается сам квест. Каждый этап требует от пользователя принятия решений, которые непосредственно влияют на развитие сюжета. В процессе прохождения симулятора, обучающиеся сталкиваются с экологическими проблемами, требующими комплексного

анализа и взвешенного выбора, например, управление водными ресурсами, сокращение выбросов или разработка стратегии утилизации отходов.

После того как пользователь ознакомится с вводной частью сюжетного квеста, ему предстоит сделать первый выбор, который станет поворотным моментом для дальнейшего развития событий. Важной особенностью симулятора является то, что каждый выбор пользователя имеет реальные последствия для хода событий, что позволяет моделировать разные сценарии и исходы. Это способствует формированию системного мышления, поскольку пользователи не только изучают теоретические аспекты экологических проблем, но и оценивают долгосрочные последствия своих решений, сопоставляя их с принципами устойчивого развития.

Пользователю будет предложено несколько последовательных решений в зависимости от контекста выбранного направления. Например, если пользователь выбрал квест, связанный с управлением водными ресурсами, первый выбор может касаться разработки стратегии по очистке и защите водоемов или созданию плана по снижению водопотребления. С каждым новым ответом события будут изменяться, демонстрируя влияние принимаемых решений на экологическую систему. Такой подход обеспечивает многовариантность квеста и делает его интерактивным и познавательным. Пользователь сможет экспериментировать с различными стратегиями и видеть, как даже незначительные решения могут повлиять на глобальную экологическую ситуацию. В итоге это способствует не только обучению, но и формированию ответственного подхода к управлению природными ресурсами. Процесс принятия решения представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Демонстрация разных направлений развития сюжета

В процессе прохождения сюжета пользователи выполняют небольшие задания, которые приближены к реальным экологическим проблемам. Например, на одном из этапов пользователю необходимо правильно расставить в порядке важности ключевые шаги для организации кампании по экономии воды или упорядочить этапы успешного внедрения системы капельного орошения.

После выполнения заданий пользователи получают обратную связь и могут посмотреть правильные ответы, что способствует обучению и самооценке. Результаты действий пользователей сохраняются и поступают к разработчикам, что позволяет использовать симулятор не только как обучающий инструмент, но и как платформу для дальнейших научных исследований.

По завершении сюжетного квеста пользователи заполняют анкету, где они могут оценить сценарий и дать обратную связь о прохождении. Это помогает разработчикам улучшать симулятор, а также дает ценную информацию для анализа пользовательских решений и дальнейших исследований.

Экологический симулятор принятия решений предлагает новый способ взаимодействия с экологическими проблемами через интерактивные образовательные сценарии, в которых пользователи могут изучить реальные проблемы, применить свои знания и увидеть результаты своих действий.

Симулятор позволяет пользователям оценивать потенциальные экологические риски и прогнозировать последствия своих действий в рамках имитируемых сценариев. Это способствует пониманию взаимосвязей между экологическими, экономическими и социальными аспектами, что необходимо для разработки комплексных мер по защите экосистем и безопасности населения. А также принятию взвешенных решений, которые учитывают все возможные последствия для окружающей среды, общества и экономики.

Эти механизмы позволяют пользователям не только анализировать экологические ситуации, но и развивать навыки стратегического планирования и прогнозирования, что является важным элементом формирования устойчивых подходов к охране окружающей среды. В результате симулятор способствует подготовке новых поколений специалистов и граждан, способных принимать ответственные решения на различных уровнях - от локального до глобального.

Апробация разработанного экологического симулятора принятия решений проводилась методом анкетирования с использованием инструмента Google Forms, что обусловлено доступностью платформы, удобством для респондентов и автоматизированной обработкой данных. Гибкая настройка структуры опроса позволила адаптировать анкету для оценки вовлеченности студентов, их способности анализировать экологические сценарии и прогнозировать последствия принятых решений. Применение данного инструмента обеспечило объективный сбор и анализ данных, способствуя всесторонней оценке эффективности симулятора в формировании экологической осознанности и компетенций обучающихся.

В социологическом исследовании приняли участие 125 студентов факультета Математики и естественных наук Северо-Казахстанского университета имени М. Козыбаева. Анкетирование включало 9 вопросов закрытого типа с одним и несколькими вариантами ответов.

Статистическая обработка данных была проведена с использованием программы Microsoft Excel. Для количественного анализа результатов анкетирования были рассчитаны средние значения (M), стандартное отклонение (SD) и стандартная ошибка (SE). Эти показатели позволили оценить разброс данных и достоверность полученных результатов.

3. Результаты

Анализ результатов апробации экологического симулятора принятия решений подтвердил высокую вовлеченность студентов в процесс использования интерактивного симулятора, а также его образовательную ценность и эффективность в формировании экологической осознанности. Оценка восприятия симулятора охватывала такие аспекты, как увлекательность игрового процесса, удобство интерфейса, эмоциональная вовлеченность, уровень познавательной ценности, а также готовность использовать его в учебной или профессиональной деятельности.

3.1. Вовлеченность студентов в использование симулятора

3.1.1. Оценка вовлеченности

Первым ключевым вопросом исследования, представленного на рисунке 4 стало определение степени вовлеченности студентов в использование симулятора. Большинство участников – 60,8% (76 человек) – отметили, что игра полностью увлекла их, что свидетельствует о высокой привлекательности данного формата обучения. Еще 32,8% (41 человек) указали, что симулятор был интересным, но имеет некоторые недочеты. Это

подтверждает, что в целом инструмент вызвал положительные эмоции и заинтересовал обучающихся. Лишь 6,4% (8 человек) сообщили, что симулятор показался им скучным.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что применение геймификации и интерактивных методик в образовательном процессе способствует поддержанию интереса обучающихся и вовлеченности в процесс обучения. Тем не менее, выявленный процент студентов, которые обнаружили недостатки или не нашли симулятор увлекательным, указывает на необходимость дальнейшего совершенствования контента, а также возможного расширения сценариев для охвата различных образовательных предпочтений.

Насколько симулятор был для вас увлекательным и интересным?

125 ответов

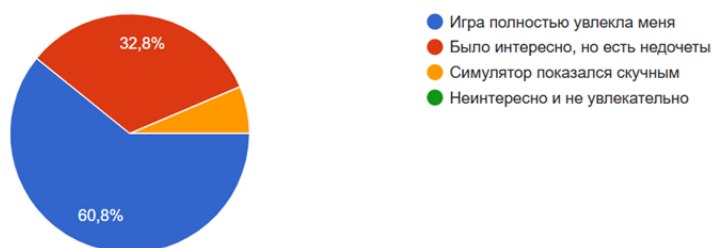


Рисунок 4. Уровень вовлеченности обучающихся

3.1.2. Оценка удобства интерфейса

Второй аспект анализа – удобство интерфейса и доступность симулятора для пользователей, представленный на рисунке 5. Положительную оценку удобству интерфейса дали 52,8% (66 человек), отметив, что он был абсолютно комфортным. Еще 38,4% (48 человек) согласились, что интерфейс удобен, но нуждается в доработке. Это означает, что более 90% пользователей нашли навигацию и дизайн симулятора интуитивно понятными.

Насколько комфортным был интерфейс симулятора?

125 ответов

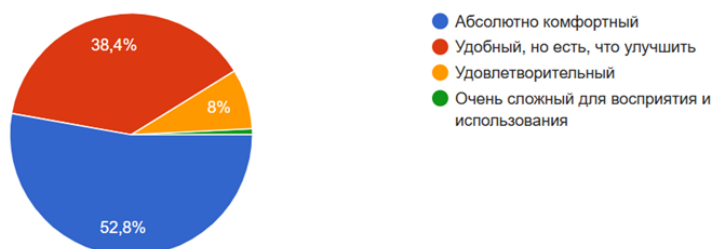


Рисунок 5. Оценка эргономических характеристик интерфейса

При этом 8% (10 человек) указали на удовлетворительный уровень удобства интерфейса, а 0,8% (1 человек) назвали его сложным для восприятия и использования. Хотя процент отрицательных отзывов минимален, эти данные указывают на необходимость дальнейшей оптимизации пользовательского опыта, например, путем добавления обучающих инструкций, упрощения интерфейса или адаптации симулятора для различных устройств.

3.1.3. Эмоциональное восприятие симулятора

Эмоциональное восприятие образовательного процесса играет важную роль в формировании мотивации обучающихся и способствует более глубокому усвоению знаний. Использование игровых и интерактивных элементов в обучении, таких как симуляторы, позволяет вовлекать студентов в учебный процесс и вызывать эмоциональный отклик, который усиливает когнитивные процессы и способствует лучшему запоминанию информации.

Наибольший процент респондентов испытывали интерес и вдохновение, что свидетельствует о высокой мотивационной ценности симулятора. Интерес является ключевым фактором вовлеченности, так как способствует активному изучению материала и повышению уровня самостоятельной познавательной деятельности. Вдохновение также играет важную роль, так как оно часто ассоциируется с желанием применять полученные знания на практике, что особенно важно в контексте формирования экологической осознанности.

Высокие показатели удовлетворения (52,8%) свидетельствуют о том, что симулятор не только предоставил студентам новые знания, но и вызвал позитивные эмоции от образовательного процесса. Это указывает на сбалансированность игрового и образовательного контента, который способен одновременно обучать и приносить удовольствие от взаимодействия. Радость, которую отметили 35,2% участников, подчеркивает, что использование интерактивных технологий в образовательном процессе может вызывать положительные эмоции, делая процесс обучения менее формализованным и более увлекательным.

Примечательно, что разочарование выразил лишь один участник опроса (0,8%), что демонстрирует практически полное отсутствие негативного восприятия симулятора. Это говорит о том, что подавляющее большинство студентов восприняли инструмент положительно и не испытали неудовлетворенности от его использования. Анализ результатов, предоставленных на рисунке 6, показывает, что высокий уровень эмоционального вовлечения коррелирует с мотивацией к изучению экологических проблем и формированием ответственного отношения к окружающей среде. Это подтверждает эффективность симулятора как образовательного инструмента, способного не только передавать знания, но и вызывать эмоциональный отклик, что значительно повышает его педагогическую ценность.

Какие эмоции Вы испытали, играя в этот симулятор? (Выберите все подходящие варианты)

125 ответов

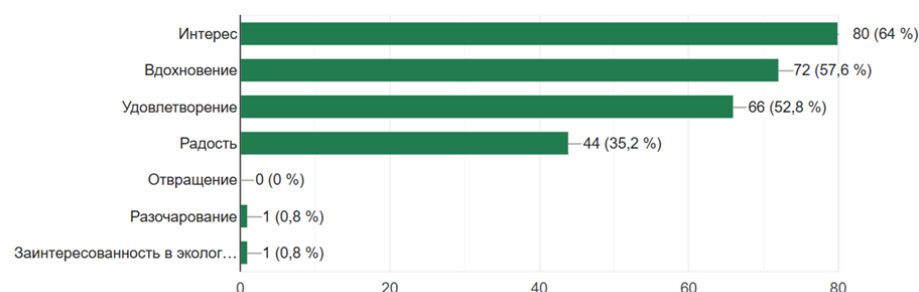


Рисунок 6. Эмоциональная вовлеченность и когнитивные эффекты

3.1.4. Познавательная ценность симулятора

Одним из ключевых показателей эффективности образовательных инструментов является объем новой информации, полученной обучающимися в процессе их использования. В рамках проведенного исследования респондентам был задан вопрос о том, узнали ли они что-то новое, работая с интерактивным симулятором. Анализ данных, представленных на рисунке 7 показывает, что почти 98% респондентов получили новую информацию, что свидетельствует о высокой познавательной ценности симулятора. Более половины студентов (53,6%) отметили, что в процессе работы с инструментом узнали много новой информации. Это подтверждает его значимость как источника актуальных знаний, особенно в контексте экологического образования, где важно не только усвоение теоретических аспектов, но и развитие навыков анализа и принятия решений. 44% респондентов указали, что получили «немного новой информации», что также является позитивным показателем. Это может означать, что симулятор помог структурировать уже имеющиеся знания, расширить понимание экологических проблем или предложил альтернативные подходы к решению задач, с которыми студенты уже были знакомы. Такой результат демонстрирует важность интерактивного обучения, поскольку оно позволяет учащимся не только получать новую информацию, но и закреплять ранее изученные концепции через активное взаимодействие с цифровым средством.

Лишь 2,4% участников (3 человека) отметили, что не узнали ничего нового. Это может быть связано с несколькими факторами: во-первых, данные студенты могли изначально обладать высоким уровнем знаний в области экологии, что сделало представленный материал для них менее информативным. Во-вторых, возможно, их низкая вовлеченность в процесс или отсутствие интереса к теме повлияло на восприятие представленных данных. Дополнительно стоит отметить, что высокая познавательная ценность симулятора может быть связана с его интерактивным форматом, который позволяет учащимся активно участвовать в процессе обучения, принимать решения и анализировать их последствия. Исследования в области педагогики подтверждают, что усвоение информации происходит эффективнее, когда студенты вовлечены в практическую деятельность, а не просто воспринимают информацию пассивно.

Узнали ли Вы что-то новое для себя, играя в этот симулятор?

125 ответов

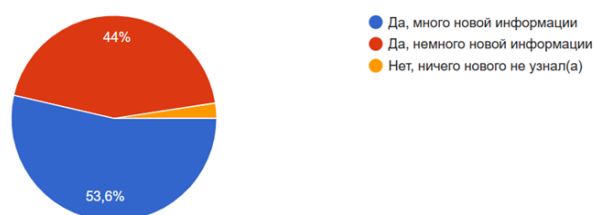


Рисунок 7. Оценка познавательной ценности цифрового инструмента

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что использование интерактивных цифровых инструментов в образовательном процессе способствует не только передаче новых знаний, но и их лучшему усвоению за счет активного взаимодействия с материалом. Данный аспект подчеркивает важность дальнейшего развития и совершенствования образовательных симуляторов, а также их интеграции в учебные программы для повышения эффективности обучения и формирования устойчивого интереса к изучаемой теме.

3.1.5. Готовность к дальнейшему использованию

Готовность студентов использовать данный симулятор или подобные цифровые инструменты в учебной или профессиональной деятельности, представлена на рисунке 8.



Рисунок 8. Готовность к дальнейшему применению симулятора

Эти данные показывают, что 98,4% респондентов готовы использовать интерактивные симуляторы в образовательной практике. Это свидетельствует о востребованности цифровых технологий в обучении и подтверждает их эффективность в формировании экологической осознанности.

3.1.6. Наиболее значимые аспекты симулятора

Участники опроса также выделили наиболее ценные аспекты симулятора. Результаты представлены на рисунке 9.

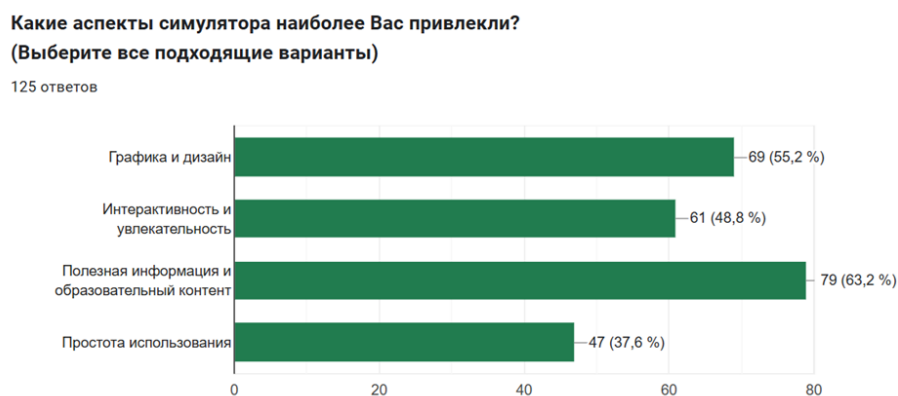


Рисунок 9. Оценка наиболее значимых аспектов симулятора

Большинство студентов отметили ценность образовательного контента, что говорит о важности наполнения симулятора качественной информацией. Графика и интерактивность также сыграли ключевую роль в вовлечении пользователей, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к разработке образовательных инструментов.

3.1.7. Восприятие реалистичности представленных сценариев

Для оценки качества моделируемых экологических ситуаций участники ответили на вопрос о реалистичности представленных сценариев. Результаты представлены на рисунке 10.

Как Вы оцениваете уровень реализма представленных в играх ситуаций?

125 ответов

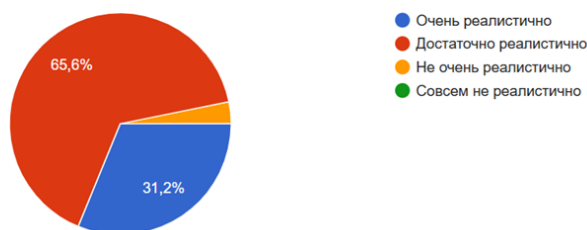


Рисунок 10. Восприятие реалистичности представленных сценариев

Таким образом, 96,8% пользователей сочли симулятор правдоподобным, что указывает на высокую достоверность разработанных сценариев и их соответствие реальным экологическим проблемам.

3.1.8. Отношение к информационно-коммуникационным технологиям

Одним из важных аспектов исследования являлось изучение отношения студентов к информационно-коммуникационным технологиям, так как их восприятие может напрямую влиять на уровень вовлеченности и эффективность использования цифровых инструментов в образовательном процессе. Результаты анкетирования показали, что большинство респондентов имеют положительное отношение к ИКТ. Результаты представлены на рисунке 11.

Каково Ваше отношение к информационно-коммуникационным технологиям (ИКТ)?

125 ответов

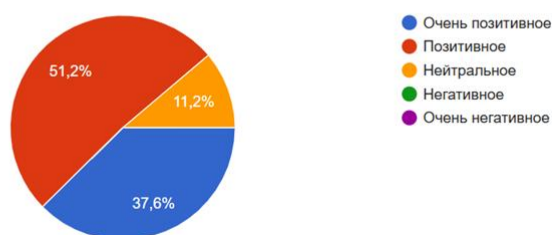


Рисунок 11. Отношение к информационно-коммуникационным технологиям

Таким образом, 88,8% студентов относятся к ИКТ положительно, что свидетельствует о высокой степени готовности обучающихся к использованию цифровых образовательных инструментов. Это подтверждает актуальность внедрения интерактивных технологий в образовательную практику, поскольку они находят отклик среди студентов и воспринимаются как удобные и эффективные средства обучения.

В то же время 11,2% участников, выбравших нейтральное отношение, могут свидетельствовать о наличии группы студентов, которые не испытывают выраженного интереса к цифровым инструментам или не видят их значительного преимущества перед традиционными методами обучения. Это указывает на необходимость дальнейшего изучения факторов, влияющих на уровень восприятия ИКТ, а также возможной адаптации образовательных программ с учетом различных категорий пользователей. Данный результат

подтверждает, что использование интерактивных симуляторов имеет значительный потенциал в образовательной среде, особенно среди студентов, обладающих высокой цифровой грамотностью. Однако важно учитывать индивидуальные различия в уровне восприятия технологий, а также необходимость методической поддержки для студентов, которые могут испытывать трудности при работе с новыми цифровыми инструментами.

3.1.9. Влияние симулятора на формирование экологического мышления

Формирование экологической осознанности является одной из приоритетных задач современного образования, особенно в условиях глобальных экологических вызовов. Осознание взаимосвязи между деятельностью человека и состоянием окружающей среды играет решающую роль в становлении ответственного отношения к природным ресурсам и поиске устойчивых решений. В данном контексте применение интерактивных образовательных технологий, таких как разработанный симулятор, приобретает особую значимость. Для оценки эффективности симулятора в формировании экологического мышления респондентам был задан вопрос о его влиянии на развитие экологической осознанности. Результаты анкетирования представлены на рисунке 12.



Рисунок 12. Влияние симулятора на формирование экологического мышления

Результаты исследования демонстрируют, что интерактивный подход способствует более глубокому пониманию экологических проблем. 71,2% студентов отметили, что симулятор оказал значительное влияние на их экологическое мышление. Это означает, что цифровая образовательная среда не только предоставила им новую информацию, но и побудила к осмыслению взаимосвязи между человеческой деятельностью и окружающей средой, а также к поиску практических решений актуальных экологических проблем.

Оставшиеся 28,8% респондентов отметили влияние симулятора на развитие их экологической осознанности, но лишь в некоторой степени. Это может указывать на несколько факторов. Первый фактор - разный уровень исходной подготовки. Те, кто уже обладал базовыми знаниями в сфере экологии, могли воспринимать симулятор не как принципиально новый инструмент, а как дополнительный источник информации, способствующий систематизации знаний. Личные образовательные предпочтения. Некоторые студенты могут быть менее восприимчивы к игровым методикам обучения и предпочитать более традиционные формы получения информации.

Второй фактор - индивидуальные различия в осознании проблемы. Уровень вовлеченности в экологические вопросы варьируется, и не все респонденты могли осознать значимость представленных проблем в равной мере. Тем не менее, даже те, кто отметил влияние симулятора в некоторой степени, признали его роль в развитии экологического мышления. Это свидетельствует о том, что цифровые образовательные технологии, особенно интерактивные, обладают высоким потенциалом в сфере формирования экологической культуры.

Таким образом, анализ анкетирования демонстрирует высокий уровень вовлеченности студентов в образовательный процесс при использовании интерактивного симулятора. Высокие показатели познавательной эффективности, эмоциональной вовлеченности и эргономичности интерфейса подтверждают значимость цифровых технологий в формировании экологической осознанности. Полученные данные позволяют констатировать, что разработанный симулятор является действенным инструментом экологического образования, способствующим развитию аналитического мышления, формированию ответственного отношения к окружающей среде и приобретению практических навыков принятия экологически ориентированных решений. Дальнейшая оптимизация интерфейса, расширение сценариев и совершенствование механизма обратной связи позволят повысить эффективность образовательного воздействия и обеспечить интеграцию симулятора в более широкий контекст цифрового обучения.

3.2. Анализ статистической значимости результатов

3.2.1. Количественные данные

Для количественной оценки восприятия симулятора были рассчитаны средние значения (M), стандартное отклонение (SD) и стандартная ошибка (SE) по ключевым параметрам исследования. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические показатели оценки симулятора студентами

Параметр	Среднее значение (M)	Станд. отклонение (SD)	Станд. ошибка (SE)	Мин	Макс
Вовлеченность	4,65	0,48	0,044	4,0	5,0
Интерфейс	4,58	0,50	0,046	4,0	5,0
Новая информация	4,55	0,50	0,045	4,0	5,0
Готовность использовать	4,68	0,47	0,042	4,0	5,0
Реализм	4,32	0,47	0,043	4,0	5,0
Отношение к ИКТ	4,26	0,65	0,058	3,0	5,0
Экологическая осознанность	4,71	0,45	0,041	4,0	5,0

3.2.2. Эмоциональная реакция студентов на симулятор

Чаще всего студенты испытывали:

- Интерес – 80 раз;
- Вдохновение – 72 раза;
- Удовлетворение – 66 раз;
- Радость – 44 раза;
- Разочарование – 1 раз (что практически незначимо).

3.2.3. Наиболее значимые характеристики симулятора по мнению студентов

Маркированные списки должны быть оформлены как:

- Полезная информация и образовательный контент – 79 раз;
- Графика и дизайн – 69 раз;
- Интерактивность и увлекательность – 61 раз.
- Простота использования – 47 раз.

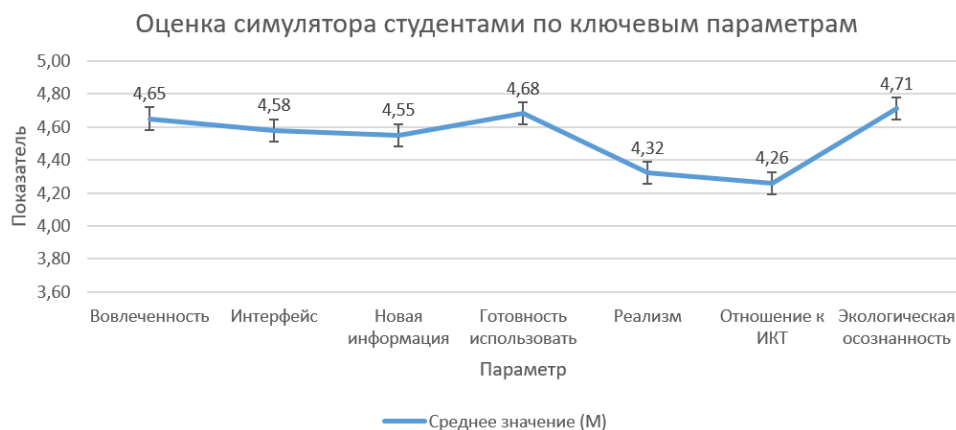


Рисунок 13. Средние значения оценки параметров симулятора студентами

Анализ средних значений показывает, что наивысшую оценку среди всех параметров получила экологическая осознанность ($M = 4.71$, $SD = 0.45$), что свидетельствует о высокой эффективности симулятора в формировании ответственного отношения к окружающей среде. Кроме того, показатели вовлеченности ($M = 4.65$, $SD = 0.48$) и готовности к использованию симулятора в будущем ($M = 4.68$, $SD = 0.47$) подтверждают высокий уровень удовлетворенности студентов данным образовательным инструментом. В то же время наименьшие средние оценки наблюдаются для реалистичности представленных сценариев ($M = 4.32$, $SD = 0.47$) и отношения к ИКТ ($M = 4.26$, $SD = 0.65$), что может указывать на необходимость доработки визуальных и технических аспектов симулятора.

Таким образом, статистический анализ подтверждает, что интерактивный симулятор не только привлекателен для студентов, но и способствует приобретению новых знаний, развитию экологической осознанности и повышению интереса к изучаемому материалу.

4. Обсуждение

Высокая эффективность симулятора как инструмента формирования экологического мышления объясняется рядом факторов. Моделирование сценариев, требующих принятия решений в условиях ограниченности ресурсов и экологических рисков, позволяло обучающимся осознавать последствия своих действий. Практическое взаимодействие с экологическими проблемами в симуляторе способствовало переходу от теоретического осознания к конкретным шагам по решению экологических вопросов. Возможность наблюдать результаты своих решений помогала студентам развивать системное мышление, а обратная связь в симуляторе позволяла оценить долгосрочное влияние различных стратегий на состояние окружающей среды.

Геймификация образовательного процесса повышала мотивацию студентов и способствовала росту интереса к изучению экологии. Возможность экспериментировать с разными стратегиями и анализировать их последствия делала процесс обучения более осмысленным, а столкновение с дилеммами, требующими взвешенного выбора, способствовало развитию аналитических способностей. Кроме того, предоставление альтернативных сценариев решения экологических проблем помогало студентам оценивать их с разных точек зрения, а эмоциональная вовлеченность в процесс принятия решений усиливала осознание значимости экологических вопросов. Важную роль играла и возможность «прожить» последствия своих действий, что создавало более сильный эффект запоминания по сравнению с традиционными методами обучения.

Полученные результаты подтверждают эффективность интерактивного симулятора в экологическом образовании. Большинство студентов отметили его влияние на формирование

экологической осознанности и развитие аналитического мышления, что свидетельствует о высокой перспективности цифровых образовательных технологий. В то же время ограничения исследования включают выборку только из студентов одного факультета и субъективность анкетных данных. Дальнейшие исследования могут предусматривать использование объективных методов оценки, интеграцию симулятора в различные образовательные программы и разработку новых сценариев, что позволит повысить его образовательную ценность.

Таким образом, подтверждается эффективность интерактивных технологий в экологическом образовании. Дальнейшая оптимизация цифровых инструментов и расширение их функционала помогут углубить понимание экологических проблем и сформировать у обучающихся более ответственное отношение к окружающей среде.

5. Заключение

В ходе апробации экологического симулятора принятия решений получены данные, позволяющие оценить его образовательную эффективность и влияние на формирование экологической осознанности у студентов. Современное экологическое образование требует использования инновационных методов, и разработанный симулятор продемонстрировал свою значимость как инструмент активного обучения. Интерактивный формат позволил пользователям не только изучить экологические проблемы, но и моделировать последствия своих решений, что способствует развитию системного мышления (Isakzhanova et al., 2023).

Результаты исследования показали, что студенты в целом положительно восприняли симулятор, отметив его информативность, интерактивность и доступность. Большинство респондентов выразили заинтересованность в его использовании в образовательном процессе, что свидетельствует о высокой востребованности подобных цифровых решений в сфере экологического образования. Вместе с тем были выявлены аспекты, требующие доработки, включая усовершенствование интерфейса, расширение сценариев и улучшение механизма обратной связи.

Таким образом, можно сделать вывод, что внедрение интерактивных технологий в образовательный процесс является перспективным направлением формирования экологической грамотности. Однако эффективность подобных инструментов напрямую зависит от их качества, адаптивности и доступности. Дальнейшее совершенствование симулятора и его интеграция в учебные программы позволят повысить уровень экологической осознанности среди обучающихся и способствовать формированию ответственного отношения к окружающей среде.

Разработан симулятор решений экологических проблем на базе интернет-ресурса. Апробация экологического симулятора принятия решений среди студентов факультета математики и естественных наук подтвердила его образовательную эффективность. Анкетирование позволило оценить уровень вовлеченности пользователей и влияние симулятора на формирование экологической осознанности. Симулятор способствовал развитию аналитического мышления и навыков принятия решений, получил положительные оценки за интерактивность и образовательную ценность. Однако выявлены аспекты, требующие доработки, включая оптимизацию интерфейса и расширение сценариев.

Использование цифровых образовательных технологий является перспективным направлением экологического образования (Nazratkulova, 2022). В дальнейшем возможно применение методов статистического анализа для более глубокой оценки влияния симулятора на уровень экологической осведомленности обучающихся. Актуальность исследований экологического образования и просвещения связана с практическим формированием навыков и является одним из главных аспектов устойчивого развития.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, К.К. и П.Д.; методология, К.К.; программное обеспечение, К.К.; валидация, К.К. и П.Д.; формальный анализ, К.К.; исследование, К.К.; ресурсы, К.К.; курирование данных, П.Д.; написание - подготовка оригинального черновика, К.К.; написание - рецензирование и редактирование, К.К. и П.Д.; визуализация, К.К.; руководство, П.Д.; администрирование проекта, П.Д. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Дмитриев Павел Станиславович – профессор, кафедра «География и экология», кандидат биологических наук, доцент, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, ул. Пушкина, 88, Петропавловск, Казахстан, 150000; dmitriev.pavel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2712-3508>

Каримова Кристина Руслановна - магистрант 2 курса образовательной программы 7М05202 Экология, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, ул. Пушкина, 88, Петропавловск, Казахстан, 150000; svvxnxxt@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7047-4420>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности: Авторы выражают признательность СКУ им. М. Козыбаева за предоставленные ресурсы и поддержку в ходе исследования. К.Р. Каримова – предварительные результаты исследования были обсуждены на конференциях и научных семинарах, что позволило уточнить методологический подход и получить конструктивную обратную связь. П.С. Дмитриев - оказал значительную помощь в организации апробации симулятора, включая координацию участников, разработку анкетирования и сбор эмпирических данных.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Abumosa, M. (2024). University students' perspectives on the use of interactive presentation technologies. *International Journal of Technology in Education and Science*, 8(4), 645–667. <https://doi.org/10.46328/ijtes.579>
2. Adieva, A. A., Medzhidov, M. A., & Musina, L. F. (2024). Rol informatsionnykh tekhnologii v obespechenii ekologicheskogo obrazovaniya: strategii prepodavaniya i ispolzovanie onlain-resursov [The role of information technologies in environmental education: Teaching strategies and the use of online resources]. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya* [Problems of Modern Pedagogical Education], 84(2), 13–16.
3. Al-Saigh, M. N., & Mahmoud, K. F. (2023). The impact of smart interactive technologies in creating personal internal spaces: An analytical study of user preferences for interactive shape characteristics. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(8), 2339–2348. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180804>
4. Barna, I., Hrytsak, L., & Henseruk, H. (2020). The use of information and communication technologies in training ecology students. *E3S Web of Conferences*, 166, 1–7.
5. Bin, Z., & Mengmeng, Z. (2025). Immersive experience and interactive design of architectural visualization based on virtual reality technology. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 34, 1-15. <https://doi.org/10.1142/S012915642540316X>

6. Chia, C., & Tsai, Y. (2025). Effect of interactive e-book use on learning engagement, satisfaction and perceived learning. *Education and Information Technologies*, 30, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s10639-025-13415-w>
7. Galiakberova, A. A., Galyanova, E. Kh., & Matveev, S. N. (2020). Metodicheskie osnovy proektirovaniya tsifrovogo simulatora pedagogicheskoi deyatel'nosti [Methodological foundations for designing a digital simulator of pedagogical activity]. *Vestnik Mininskogo universiteta [Minin University Bulletin]*, 3, 1–16.
8. Guana-Moya, J., Arteaga, Y. A., Criollo-C, S., & Cajamarca-Carrazco, D. (2024). Use of interactive technologies to increase motivation in university online courses. *Education Sciences*, 14(1), 1–28.
9. He, R., Xu, W., Dong, D., & Yu, Z. (2024). A meta-analysis of the effect of interactive technologies on language education. *International Journal of Adult Education and Technology*, 15(1), 1–28. <https://doi.org/10.4018/IJAET.340933>
10. Hussain, S., Sharma, S., Sobti, R., & Singh, A. (2025). Science, technology, and novelty for sustainable development goals: Perspectives and challenges from environment, ecology, and human society in a changing world. In *Role of Science and Technology for Sustainable Future* (pp. 3–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5177-8_1
11. Isakzhanova, I. P., Korovin, A. Yu., & Arutyunyan, A. A. (2023). Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii v protsesse vospitatel'noi raboty v kolledzhe [Information and communication technologies in the educational process at college]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences]*, 4-2(79), 194–199.
12. Khazratkulova, A. V. (2022). Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii v sisteme obrazovaniya [Information and communication technologies in the education system]. *Obrazovanie i innovatsionnye issledovaniya [Education and Innovative Research]*, 4, 115–120.
13. Kondratenko, E., Kondratenko, B., Rybakov, A., & Svetlova, V. (2024). Interactive learning as means of formation of future teachers' readiness for self-education. *Review of European Studies*, 7(1), 35–42.
14. Kornilov, Yu. V., & Levin, I. P. (2017, September 28). Geimifikatsiya i veb-kvesty: razrabotka i primeneniye v obrazovatel'nom protsesse [Gamification and web quests: Development and application in the educational process]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26865>
15. Mar, G., Sandoval, A., Garcia, P., & Avila, A. (2025). Edublog for teaching mathematical modeling in ecology. *Gamification and Augmented Reality*, 3, 1–9.
16. McGuire, R., Hayashi, K., Xinyi, Y., & Carita Vaz, M. (2022). EcoEvoApps: Interactive apps for theoretical models in ecology and evolutionary biology. *Ecology and Evolution*, 12, 1–9.
17. Misnikova, A. S. (2024, September 28). Razvitiye simulatorov i ikh ispolzovaniye v obrazovatel'nom protsesse [Development of simulators and their use in the educational process]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. <https://scienceforum.ru/2024/article/2018036519>
18. Nazlidou, I., Efkolidis, N., Kakoulis, K., & Kyratsis, P. (2024). Innovative and interactive technologies in creative product design education: A review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(2), 47.
19. Ni, V., & Agus, P. (2024). Literature review on the use of interactive labs technology in the context of science education. *International Journal of Ethnoscience and Technology in Education*, 1(1), 76–96. <https://doi.org/10.33394/ijete.v1i1.12154>
20. Scheel, C., & Vazquez, M. (2024). The role of innovation and technology in industrial ecology systems for the sustainable development of emerging regions. *Journal of Sustainable Development*, 4(6), 197–210. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n6p197>

21. Sibley, L., Russ, H., Ahmad, G., & Baumgartner, B. (2024). Does technology-based non-interactive teaching enhance students' learning in the classroom? *Computers and Education Open*, 7, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2024.100233>
22. Simonova, I. N. (2013). Issledovanie IKT-kompetentnosti studentov tekhnicheskogo vuza kak komponenta formirovaniya ekologicheskikh znaniy i umeniy [Study of ICT competence of technical university students as a component of environmental knowledge and skills formation]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 10-8, 1814–1817.
23. Wu, J., Guo, S., Huang, H., Liu, W., & Xiang, Y. (2018). Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 3(3), 2389–2406. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2812301>
24. Yaseen, H., Mohammad, A. S., Ashal, H., & Abusaimh, H. (2025). The impact of adaptive learning technologies, personalized feedback, and interactive AI tools on student engagement: The moderating role of digital literacy. *Sustainability*, 17(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su17031133>
25. Yulmetova, R. F., Malysheva, M. O., & Sisyukov, A. N. (2020). IT-tekhnologii v ekologicheskom obrazovanii [IT technologies in environmental education]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High-Tech Technologies], 4-1, 159–163.
26. Zhang, A., Gong, Y., Chen, Q., & Xu, J. (2025). Driving innovation and sustainable development in cultural heritage education through digital transformation: The role of interactive technologies. *Sustainability*, 17(1), 1–32. <https://doi.org/10.3390/su17010314>

Экологиялық зейін интерактивті тренажерлердің білім беру әлеуетінің негізгі аспектісі ретінде

Павел Дмитриев, Кристина Каримова

Аңдатпа: Мақалада білім алушылардың экологиялық санасын қалыптастыруға және олардың аналитикалық қабілеттерін дамытуға бағытталған шешімдер қабылдаудың әзірленген экологиялық симуляторын сынақтан өткізуге талдау берілген. Зерттеудің өзектілігі оқыту сапасын арттыру, табиғи ресурстарды тұрақты басқару дағдыларын дамыту және негізделген экологиялық шешімдер қабылдау үшін білім беру процесіне интерактивті цифрлық технологияларды енгізу қажеттілігіне байланысты. Зерттеу барысында Google Forms көмегімен сауалнама әдісі қолданылды, бұл пайдаланушылардың қатысуын, интерфейстің ыңғайлылығын, білім беру құндылығын және тренажер сценарийлерінің шынайылығын объективті және жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Аprobация нәтижелері респонденттердің көпшілігі симуляторды оң қабылдағанын, оның интерактивтілігін, ақпараттылығын, практикалық маңыздылығын және оқу іс-әрекетінде қолданудың ыңғайлылығын атап өтті. Сонымен қатар, интерфейсін оңтайландыруды, сценарийлерді кеңейтуді және кері байланыс механизмін жетілдіруді қоса алғанда, жетілдіруді қажет ететін аспектілер анықталды. Алынған деректер экологиялық білім беруде интерактивті цифрлық құралдарды пайдалану перспективасын растайды. Тренажерді одан әрі жетілдіру, оны әртүрлі білім деңгейлеріне бейімдеу және оқу бағдарламаларына интеграциялау экологиялық сауаттылық деңгейін едәуір арттыруға, сыни ойлауды дамытуға, тұрақты мінез-құлық үлгілерін қалыптастыруға және нақты экологиялық жағдайларда жүйелі талдау, болжау және тұрақты шешімдер қабылдау дағдыларын қалыптастыруға ықпал етуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, тренажердің функционалдығын кеңейту студенттердің мотивациясын арттырып, білімді терең игеруге ықпал етеді. Болашақта мұндай цифрлық құралдарды пайдалану білім беру тәсілдерін жаңғыртудың маңызды қадамы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: экология, тұрақты даму, экологиялық білім, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар, интерактивті тренажер, экологиялық сана, цифрлық білім беру құралдары.

Environmental awareness as a key aspect of the educational potential of interactive simulators

Pavel Dmitriyev, Kristina Karimova

Abstract: The article analyzes the approbation of the developed ecological decision-making simulator aimed at fostering students' environmental awareness and analytical skills. The relevance of the study is driven by the need to integrate interactive digital technologies into education to enhance learning quality, develop sustainable resource management skills, and support informed environmental decision-making. A survey using Google Forms assessed user engagement, interface usability, educational value, and scenario realism. The results showed that most respondents positively perceived the simulator, highlighting its interactivity, informativeness, and practical significance. However, areas for improvement were identified, including interface optimization, scenario expansion, and enhancement of the feedback mechanism. The findings confirm the potential of digital tools in environmental education. Further development of the simulator, its adaptation to different educational levels, and integration into curricula will enhance environmental literacy, foster critical thinking, and support sustainable decision-making in real-world situations. Expanding the simulator's functionality can also increase student motivation and contribute to the modernization of educational approaches.

Keywords: ecology, sustainable development, environmental education, information and communication technologies, interactive simulator, environmental awareness, digital educational tools.

Paleoclimate analysis of the Early Miocene in the Kushuk locality (Turgai Depression) based on the Coexistence Approach method

Aizhan Zhamangara^{1,2}, Shahizada Akmagambet^{1,2*}, Saida Nigmatova³

¹Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan;

kashagankizi@mail.ru, ashakhizada@gmail.com

²Astana International University, Astana, Kazakhstan;

kashagankizi@mail.ru, ashakhizada@gmail.com

³Institute of Geological Sciences named after. K.I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan; nigmatova@mail.ru

*Correspondence: ashakhizada@gmail.com

Abstract: This article reconstructs the Early Miocene climate of the Turgay Trough in Central Asia, using the Coexistence Approach (CA) and paleofloristic data from Kushuk. Its main goal is to determine climatic parameters and ecosystem changes in the Early Miocene. Results indicate a warm-temperate climate with mild winters and sufficient rainfall, featuring a mean annual temperature of 14.2°C and mean annual precipitation of 898.5 mm. These conditions supported diverse forest ecosystems, including broadleaf and mixed woodlands. A comparison with the modern climate shows a strong contrast, suggesting increased continentality and reduced moisture availability. This evidence supports a gradual climatic cooling and drying during the Miocene, driven by global and regional factors such as tectonic uplift and oceanic currents.

The study underscores the climatic evolution of Central Asia and validates the CA method as an effective tool for paleoclimatic studies. Findings can be applied to climate modeling and assessing how shifts in temperature and precipitation influenced Neogene ecosystems. Planned research will examine the interplay of climatic and geological factors, focusing on how changes in precipitation patterns shaped habitat distribution and species composition. These data provide a basis for refining paleoclimatic models and reconstructing biosphere dynamics in the Neogene, thereby advancing our understanding of how climate influenced regional development and biodiversity.

Keywords: Lower Miocene, Turgai trough, paleoclimatic reconstruction, nearest modern analogues (NLR) method

Citation: Zhamangara, A., Akmagambet Sh., Nigmatova, S. (2025). Paleoclimate analysis of the Early Miocene in the Kushuk locality (Turgai Depression) based on the Coexistence Approach method. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 150(1), 171-184. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-171-184>

Academic editor:
Zh.G. Berdenov

Received: 07.11.2024

Revised: 19.12.2024

Accepted: 10.03.2025

Published: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introduction

The Kushuk locality, situated in the Turgai Basin of Kazakhstan, represents a crucial site for the investigation of Tertiary flora and the reconstruction of ancient climatic patterns in Central Asia (Kornilova, 1960; Nigmatova et al, 2023). The first studies of this place began in 1912. Since then, numerous excavations have revealed a rich diversity of

flora and faun (Kornilova, 1960). In the middle of the XX century, Kornilova, V.S. made a significant contribution to the study of Kushuk's flora, providing valuable insights into the climatic and ecological conditions of the Miocene (Kornilova, 1960, 1949, 1956, 1955; Nigmatova, 2023).

Understanding the paleoclimatic evolution of regions like the Turgai Basin is crucial for contextualizing broader patterns of global climate change throughout the Cenozoic (Zachos et al., 2001; Wang, 2009). Furthermore, the unique characteristics of Central Asian deserts, as detailed by Graham (2011), underscore the importance of regional studies in unraveling the complex history of climate and ecosystem dynamics. Recent research, such as that conducted by Zhamangara et al. (2025) in the nearby Erzhilansay region, highlights the continued importance of utilizing modern methodologies to refine our understanding of Early Miocene paleoclimates in Central Asia. This emphasizes the evolving nature of paleoclimatic studies and the increasing precision achieved through contemporary techniques.

To accurately reconstruct the paleoclimate, this study uses the Coexistence Approach (CA). This method evaluates climatic parameters by comparing the ecological ranges of modern analogs with fossil flora. The CA method has proven to be a reliable tool for assessing temperatures and precipitation in paleobotanical research.

In 2024, a scientific expedition to Kushuk conducted detailed mapping and photographic documentation. Despite the absence of new floral remains, existing morphological descriptions from previous studies allowed for the application of the Coexistence Approach (CA). This research aims to determine the climatic conditions of the Lower Miocene and their role in the ecological evolution of the region.

This study aims to reconstruct the climatic conditions of the Lower Miocene in present-day Kazakhstan. The findings will enhance our understanding of regional climatic evolution and the role of vegetation in these processes.

2. Materials and methods

2.1. Location and geological context

The study was conducted in the Kushuk tract, located in the Turgai depression in the territory of modern Kazakhstan. This place is one of the most significant for studying the tertiary flora and fauna of the region due to the unique geological conditions that contributed to the preservation of fossil remains (Kornilova, 1960, 1956). The outcrops along the banks of the Uluzhilanchik River are alternating layers of sands and clays with varying degrees of obliquity and leafiness, which indicates variable sedimentation conditions (figure 1). In some lenses stretched along the outcrops, there is a joint burial of fauna and flora, which makes this place especially important for paleontological and paleobotanical research.

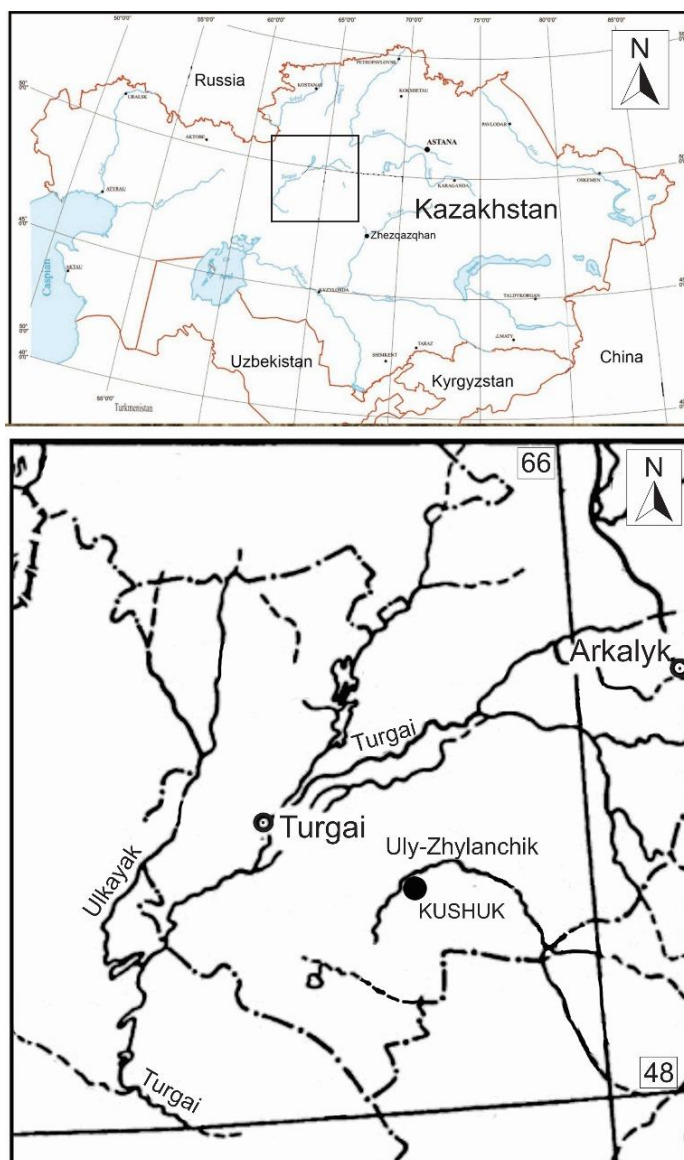


Figure 1. Location map of the Kushuk site in the Turgai Depression, Kazakhstan

During the 2024 summer expedition, field work was carried out, including mapping of outcrops, photo documentation of sections and collection of samples for subsequent analysis. In the course of field work, layers of light chocolate color containing highly decomposed plant residues were discovered. Unfortunately, no samples of floral remains have been found.

2.2. Current Climatic Conditions

The current climatic conditions in the Turgai region, located at coordinates 49.01°N and 65.30°E, are characterized by a mean annual temperature of 1-4°C, with an average temperature in the coldest month of January ranging from -15 to -17°C and reaching as low as -44°C (-47°C in some areas, such as Kushmurun). The warmest month, July, has an average temperature around 24°C in the southern parts of the region, but temperatures can reach up to 40-45°C on hot days. The duration of the warm period, when temperatures are above zero, averages 210-218 days in the southern half of the region. Annual precipitation decreases to 220 millimeters or less towards the southern areas, and the warm season (April-October) sees more precipitation than the cold season. Summer experiences significantly more rainfall than other seasons (Kazhydromet, 2024).

2.3. Analysis of floral composition

The work of Kornilova, V.S. (1960) presents data on the floral composition of the Lower Miocene in the region of the Turgai trough. Paleoclimatic reconstruction was performed based on the diversity and composition of fossil plants found at the Kushuk site. These data were supplemented with information from the Palaeoflora Database, which made it possible to determine the closest modern analogues (NLR) for each taxon (Utescher et al., 2024)

2.4. Methods

The Coexistence Approach (CA) was used for paleoclimatic reconstruction of the Lower Miocene of the Turgai Depression. This method is based on intersecting the ecological characteristics of modern analogs (NLR) of fossil plants to estimate climatic parameters under which the fossil flora could exist (Utescher et al., 2014). The method accounts for potential variability in the ecological ranges of modern analogs, ensuring more accurate reconstructions of ancient climatic conditions. Previous studies, such as Bruch et al. (2007), have demonstrated the effectiveness of CA in reconstructing Miocene climates in Europe, particularly in identifying temperature and precipitation patterns that shaped regional ecosystems (Bruch et al., 2007). These findings provide a comparative framework that strengthens the relevance of applying CA to the Turgai Depression. Similarly, Popova et al. (2019) successfully applied CA to analyze Early Miocene climates in Central Asia, revealing significant precipitation variability and its influence on vegetation. This study highlights regional climatic dynamics that align closely with the objectives of this research.

In addition to the CA method, this study also incorporates data on the leaf physiognomy of fossil leaves, which allows for a more accurate reconstruction of the paleoclimate (Jacques et al., 2011). This approach, based on the analysis of morphological features of leaves, is an important tool in paleobotanical research. Furthermore, to reinforce the data on paleoclimate reconstruction, the results of fossil mammal studies are used, which also provide valuable information about climatic changes in Eurasia (Fortelius et al., 2002).

Other paleoclimate reconstructions, such as those by Grimalt and Targarona (2017), Ivanov et al. (2011), and Liu et al. (2011), emphasize the integration of leaf assemblage data and climatic modeling. This approach enhances the reliability of CA results by providing robust datasets for validating reconstructed climatic parameters and understanding broader paleoclimatic trends. Ivanov et al. (2011) analyzed vegetation and climate dynamics in Eastern and Central Paratethys, while Liu et al. (2011) focused on Miocene climate evolution in North China. These studies underline the reliability and adaptability of CA for diverse geographic and temporal contexts. The reconstruction process involved several integrated stages. Fossil flora from the Kushuk site was analyzed using data from Kornilova's studies (1960) and the Palaeoflora Database (Utescher et al., 2024). These data provided the basis for matching fossil species with their closest modern relatives based on ecological and climatic similarities. Using the climatic ranges of these modern analogs, the climatic conditions of the Lower Miocene were reconstructed. This approach was further validated by referencing studies like Bruch et al. (2006, 2007), which highlighted temperature and precipitation patterns in Miocene Europe, and Popova et al. (2019), which provided insights into precipitation variability in Central Asia. Additionally, Ivanov et al. (2011) and Liu et al. (2011) emphasized the importance of vegetation-climate interactions in Eastern Paratethys and North China, respectively, offering comparative frameworks for this study. The data integration and analysis were conducted using manual calculations and cross-referencing with existing datasets, ensuring the effective utilization of both historical and modern sources. No new floral remains were found during fieldwork, but the extensive material previously collected and described in the literature provided a solid foundation for a comprehensive paleoclimatic reconstruction. The

reliance on well-documented historical datasets ensured that the findings remain robust despite the absence of new samples.

3. Results

Based on the data presented in the work Kornilova, V.S. (Kornilova, 1960; Kurllov et al., 2015), work was carried out to determine the closest modern analogues (NLR) using the Palaeoflora Database (Utescher et al., 2024). This made it possible to carry out a more accurate climatic reconstruction, taking into account the temperature and precipitation ranges in which modern analogues of fossil flora existed.

The study of the flora of the Kushuk location made it possible to identify 42 species of plants belonging to 21 families (Kornilova, 1960). The main part of the flora consists of woody and shrubby plants, which indicates the existence of a warm temperate climate with pronounced seasonal fluctuations in temperature and precipitation. The main groups of plants are represented by the following taxa:

Paleofloristic analysis data indicate that the climate in the Lower Miocene in the Kushuk region was moderately warm, with distinct seasons. The predominance of broad-leaved forests, such as oak and walnut, indicates sufficient rainfall and mild winters. This is confirmed by the presence of species that require high humidity, such as *Betula subpubescens* and *Alnus palaeojaponica*.

The presence of species from the Fagaceae and Juglandaceae families suggests that summer temperatures were moderately high, which contributed to the growth of dense broadleaf forests. The combination of shrubby and herbaceous plants such as *Rosa* and *Gleditsia* indicates the presence of drier areas, especially in interfluves and open spaces.

Thus, the flora of Kushuk indicates the presence of ecosystems with a warm temperate climate, which are characterized by a variety of plant formations, including forest, shrub and aquatic ecosystems. This confirms the favorable climatic conditions that existed in the Lower Miocene.

To reconstruct the paleoclimatic conditions of the Kushuk location (Lower Miocene), the data on the floral composition presented in the work were used Kornilova, V.S. (1960), as well as the method of co-existence with the determination of the nearest modern analogues (NLR taxa) using the Palaeoflora Database (Utescher et al., 2024). Based on these data, the key climatic parameters for the reconstruction of the conditions of that period were determined.

Table 1. The main climatic parameters for the location of Kushuk

Parameter	Minimum	Minimum
Mean Annual Temperature (MAT), °C	12.8	15.7
Coldest Month Temperature (CMT), °C	0.7	2.2
Warmest Month Temperature (WMT), °C	24.3	25.1
Mean Annual Precipitation (MAP), mm	644	1153
Precipitation in the Wettest Month (MPWET), mm	108	168
Precipitation in the Driest Month (MPDRY), mm	20	30
Precipitation in the Warmest Month (MPWARM), mm	108	356

The analysis of temperature indicators allowed us to conclude that the climate in the Lower Miocene of the Kushuk region was warm and temperate, which contributed to the growth of mixed forests:

The average annual temperature (MAT) ranged from 12.8°C to 15.7°C, indicating the presence of a warm climate. The temperature of the coldest month (CMT) ranged from 0.7°C to

2.2°C, indicating mild winters. The temperature of the warmest month (WMT) was in the range of 24.3°C – 25.1°C, indicating a warm but not extremely hot summer.

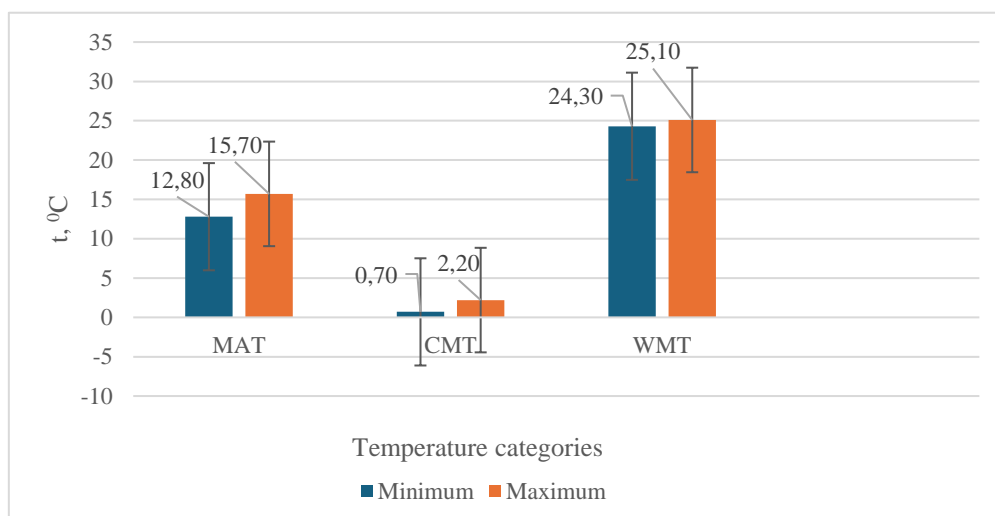


Figure 2. Temperature Regime for the Kushuk Site

Figure 2 clearly demonstrates the annual temperature fluctuations. It is evident that winter values do not drop below 0 °C, while in the summer months they reach around 25 °C, confirming the presence of a warm temperate climate in the region.

The paleoclimatic reconstruction of precipitation revealed the following characteristics:

The mean annual precipitation (MAP) ranged from 644 mm to 1153 mm, indicating moderately humid conditions.

Precipitation in the wettest month (MPWET) reached up to 168 mm, confirming the presence of a rainy season.

Precipitation in the driest month (MPDRY) was minimal, ranging from 20 mm to 30 mm, indicating brief dry periods.

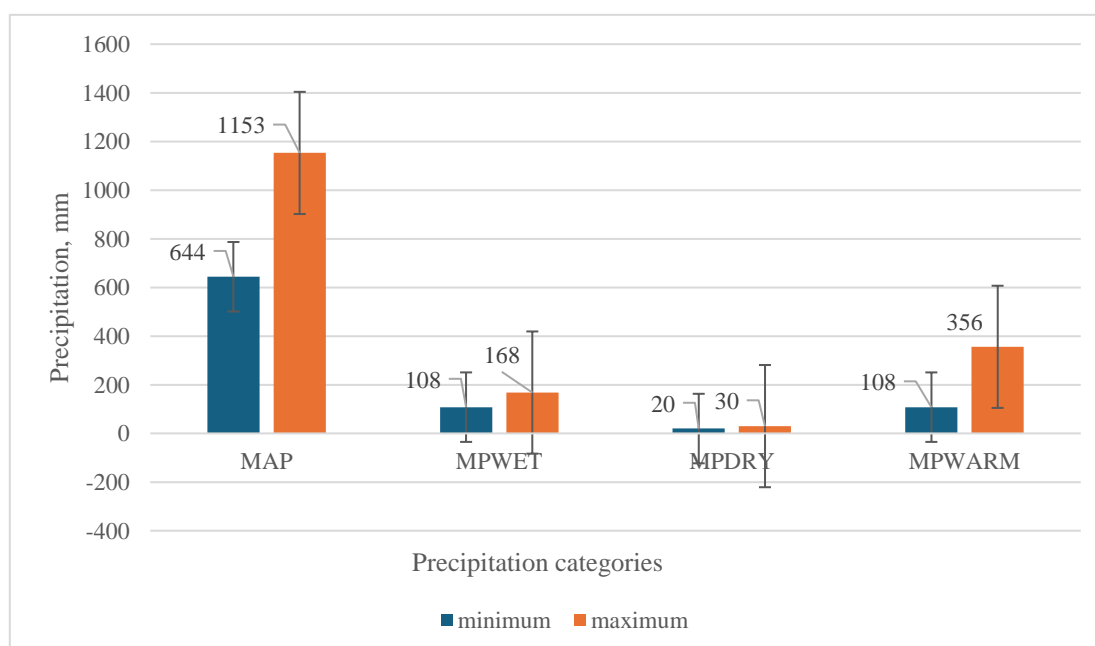


Figure 3. Precipitation distribution for the Kushuk Site

Figure 3 illustrates the seasonal fluctuations in precipitation, showing increased rainfall during the wettest months and decreased rainfall during the driest periods, thereby confirming the region’s precipitation pattern.

An analysis of the correlation between temperature and precipitation regimes revealed a weak negative correlation ($r = -0.02$), indicating a lack of strong dependency between these two parameters.

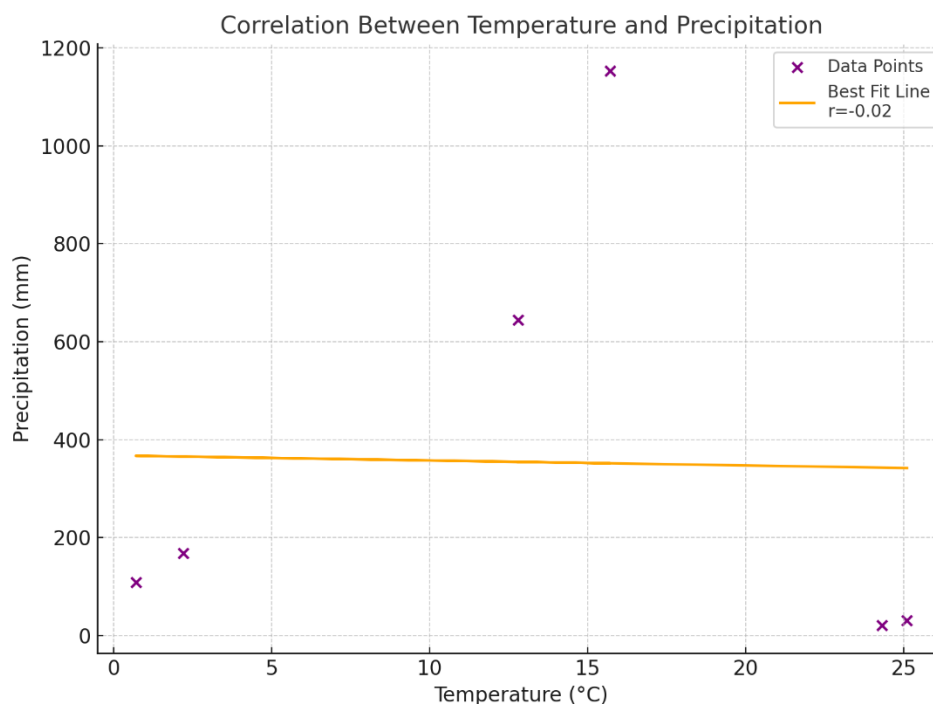


Figure 4. Correlation between Temperature and Precipitation

Figure 4 shows the correlation between temperature and precipitation regimes, highlighting their lack of dependence on each other. Based on the paleoclimatic reconstruction, the following conclusions can be drawn:

The climate in the Kushuk area during the early Miocene was warm-temperate, with mild winters and warm summers.

The annual precipitation was sufficient to support abundant vegetation, particularly during the rainy season.

The weak correlation between temperature and precipitation confirms their relative independence, which is typical of regions with moderately humid climates.

Thus, the climatic conditions of the early Miocene promoted the development of diverse ecosystems, including broadleaf forests and shrub formations, which supported the flora of the Kushuk region.

4. Discussion

The paleoclimatic reconstruction of the early Miocene using the nearest living relative (NLR) method provided detailed insights into the climatic conditions of the Turgai Depression during this period. A key aspect of this study was comparing the reconstructed data with contemporary climate indicators and examining it alongside the findings of other studies on paleoclimate. This section also includes graphs illustrating climate changes, allowing for a clear visualization of the region's climatic evolution.

4.1 Paleoclimate Reconstruction of the Early Miocene

The reconstruction revealed that during the early Miocene, the Turgai Depression was characterized by a warm temperate climate. The mean annual temperature (MAT) during this period ranged from 15.7°C to 17.8°C, significantly higher than present-day values. These findings align with those of Bruch et al. (2007), who recorded a mean annual temperature of approximately 15°C for the Oligocene-Miocene period in the Turgai Depression.

Our data also indicated that mean annual precipitation (MAP) ranged from 1150 mm to 1613 mm, suggesting a much wetter Miocene climate compared to current precipitation levels (220-330 mm). This shift reflects a notable decrease in regional moisture availability in modern times. Bruch et al. (2007) similarly reported evidence of a wetter Miocene climate, which corroborates our conclusions. These results demonstrate that the climate in the Turgai Depression during the early Miocene was considerably milder and more humid, supporting rich and diverse ecosystems, including forest formations and dense shrublands. Together with other studies, these findings contribute to a comprehensive picture of the region's climate change, highlighting the gradual cooling and aridification that have led to the present-day conditions characterized by steppe and semi-desert landscapes.

4.2 Comparison with Contemporary Climate Conditions

The modern climate of the Turgai Depression differs significantly from Miocene conditions. The current mean annual temperature ranges from 1°C to 4°C, indicating substantial cooling since the Miocene. Additionally, contemporary winter temperatures (CMT) can drop to -16°C or lower, whereas Miocene winter temperatures were considerably milder, ranging from 3.4°C to 8.1°C.

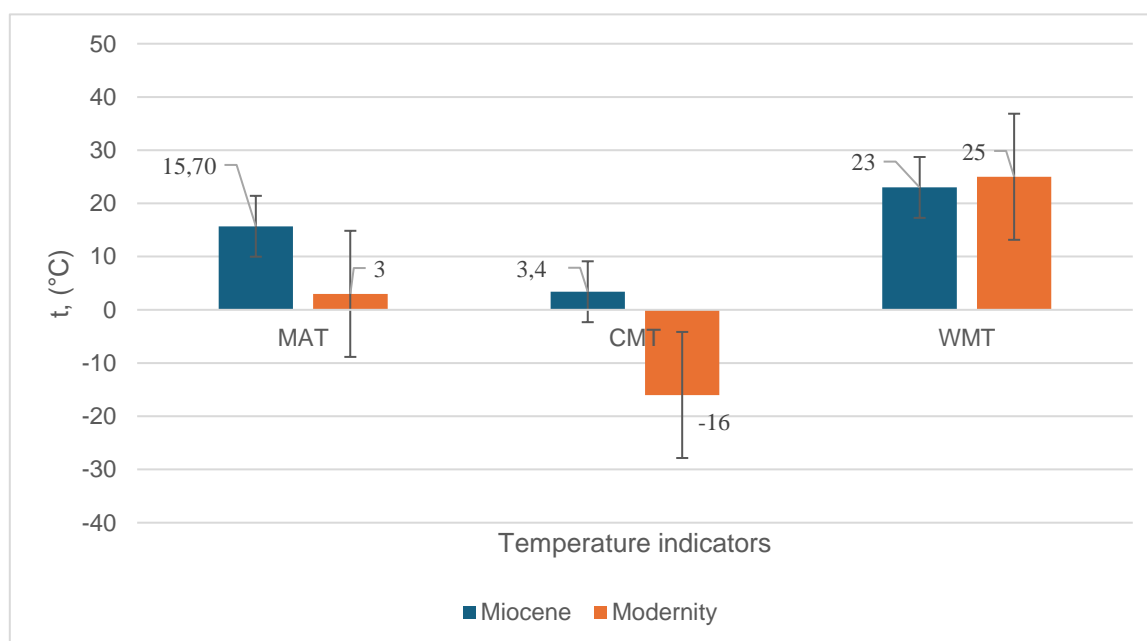


Figure 5. Comparison of Temperature Regimes in the Lower Miocene and Present Day

Figure 5 illustrates a significant cooling trend in the climate. The mean annual temperature (MAT) during the Miocene was approximately 15.7°C, much higher than the current 3.0°C. Changes are especially noticeable in the winter months: the coldest month temperature (CMT) in the Miocene was 3.4°C, whereas today it falls to -16°C, indicating a marked increase in continentality and winter severity.

Summer temperatures (WMT) have remained relatively stable, at 23°C in the Miocene and 25°C today. This suggests that the most pronounced climate changes occurred during the winter, while summer has retained relatively mild conditions over millions of years.

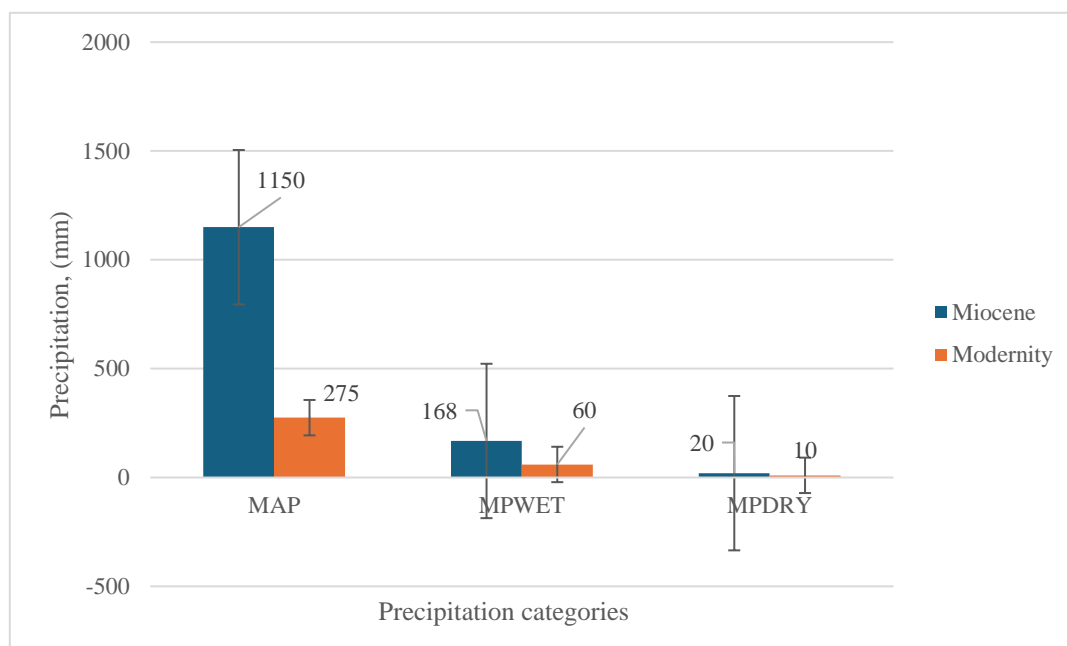


Figure 6. Comparison of Precipitation in the Lower Miocene and Present Day

Figure 6 highlights a substantial reduction in precipitation from the Miocene period to the present day. During the Miocene, mean annual precipitation (MAP) was approximately 1150 mm, whereas today it has decreased to 275 mm, indicating a shift toward a drier climate in the region. In the wettest months (MPWET), precipitation in the Miocene reached 168 mm, which is much higher than the modern 60 mm. Even in the driest months (MPDRY), precipitation in the Miocene was 20 mm, compared to the current 10 mm.

This reduction in precipitation led to a transformation of the region's ecosystems, with a shift from forests to steppe and semi-desert landscapes, as is evident from the region's current climatic and ecological conditions.

The comparison of early Miocene and modern climate conditions in the Turgai Depression reveals significant changes in temperature and precipitation patterns. The Miocene climate was considerably milder and wetter, with higher annual temperatures and greater precipitation, supporting extensive forest ecosystems. The modern climate of the region is marked by a sharp cooling, especially in the winter months, and a significant decrease in precipitation, leading to arid conditions and a shift from forested landscapes to steppe and semi-desert environments.

These climatic shifts illustrate the increased continentality of the region and a trend toward more extreme seasonal variations in temperature and precipitation, profoundly impacting the ecological and biological processes in the area.

Our findings align with other studies on the Miocene climate in Central Eurasia. For instance, research on the Kumyrtas flora in Western Siberia (Popova et al., 2012) presents similar climate conditions for that period, including mild winters and abundant rainfall. However, as noted in their work, the climate in Western Siberia was somewhat cooler than in the Turgai Depression, indicating spatial variations in regional climate. The results obtained indicate significant climatic changes in the Turgai Depression during the Miocene. Similar trends are observed in other regions, such as the Aegean Sea (Aksu et al., 1995), the Tarim Basin (Dupont-Nivet et al., 2007; Sun et al., 2010), and

Central Europe (Mosbrugger et al., 2005). The analysis of fossil Juglandaceae (Tiffney & Manchester, 2001) supports the data on the composition of vegetation. Comparison with the works of Bruch et al. (2006, 2007), Ivanov et al. (2011) also suggests that the early Miocene experienced wetter and more stable climatic conditions that supported dense forests. As these studies indicate, a gradual decrease in temperatures and precipitation occurred throughout the Miocene, leading to changes in the floral and faunal communities in the region. Additionally, studies such as Liu et al. (2011) and Grimalt and Targarona (2017) highlight similar climatic trends in North China and Central Asia, emphasizing the significance of vegetation-climate interactions during this period.

The paleoclimatic reconstruction of the early Miocene for the Turgai Depression region demonstrates that the climate during that period was considerably warmer and wetter than it is today. These shifts in climate conditions, including decreased precipitation and intensified seasonal temperature fluctuations, contributed to the transformation of the region's ecosystems. Our results align with these studies, supporting the hypothesis of substantial climate change from the Miocene period to the present day. By integrating findings from multiple studies, including those of Popova et al. (2019), our reconstruction reinforces the understanding of how Miocene climatic shifts influenced Central Eurasia's ecological and evolutionary pathways.

5. Conclusion

The Lower Miocene climate in the Turgai Depression was characterized by warm-temperate conditions, mild winters, and sufficient rainfall, supporting diverse forest ecosystems. These findings highlight a significant contrast with modern climatic conditions, where cooler temperatures and reduced precipitation dominate, contributing to the development of steppe and semi-desert landscapes.

The reconstructed climate parameters, such as a mean annual temperature (MAT) of 14.2°C and mean annual precipitation (MAP) of 898.5 mm, provide robust evidence of a wetter and milder climate during the Early Miocene. These results align with regional studies and reinforce the hypothesis of a gradual cooling and drying trend throughout the Miocene, driven by global climatic shifts and regional geographic factors.

This study contributes to a broader understanding of Central Asia's climatic evolution, offering insights into how ancient ecosystems responded to long-term climatic changes. The integration of the Coexistence Approach (CA) with existing paleofloristic data further demonstrates the reliability of this method for paleoclimate reconstruction and its applicability to other regions with rich fossil records. Future research could explore the interplay of climatic and geological factors to further refine our understanding of ecosystem transformations during the Neogene.

6. Supplementary Materials. No Supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization, methodology, and investigation – Sh.A.; supervision and project administration – A.Zh. and S.N.; validation and review – A.Zh. and S.N.; data curation and visualization – Sh.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Zhamangara Aizhan Kashagankyzy - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, researcher, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev st., 36, Almaty, Kazakhstan, 050000; Astana International University, Kabanbay batyr str., 8, Astana, Kazakhstan, 010000; kashagankyzy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2348-1711>

Akmagambet Shahizada Beyimbetkyzy – corresponding author, Master of Biology, Junior Researcher, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev st., 36, Almaty, Kazakhstan,

050000; Astana International University, Kabanbay batyr st., 8, Astana, Kazakhstan, 010000; ashakhizada@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6330-4800>

Nigmatova Saida Arapovna - Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, researcher, Institute of Botany and Phytointroduction, Timiryazev st., 36 Almaty, Kazakhstan; Institute of Geological Sciences named after K.I.Satpaev, Satpaev st., 22a, Almaty, Kazakhstan, 050000; nigmatova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3199-1658>

9. Funding: This research was funded by the grant project AP19677563 “Study of paleoflora and climate of Central Kazakhstan at the boundary of the Oligocene and Miocene and the initial stage of desertification of the region” (2023–2025).

10. Acknowledgements: The authors have no additional acknowledgments to report.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Aksu, A. E., Hiscott, R. N., Yaşar, D., & Mudie, P. J. (1995). Paleoclimatic and paleoceanographic evolution of the Aegean Sea during the last 5 million years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 116(1-2), 91-133.
2. Bruch, A. A., Mosbrugger, V., & Uhl, D. (2007). Miocene climate in Europe – patterns and evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 253(1-2), 17. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.031>
3. Bruch, A. A., & Zhilin, S. G. (2006). Early Miocene climate of Central Eurasia – Evidence from Aquitanian floras of Kazakhstan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 248(1-2), 32-48.
4. Dupont-Nivet, G., Krijgsman, W., Langereis, C. G., Abels, H. A., & Dai, S. (2007). Tibetan plateau uplift constrained by magnetostratigraphically dated fluvial sediments across the NE Tarim Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(1-2), 195-205.
5. Fortelius, M., Eronen, J., Jernvall, J., Liu, L., Pushkina, D., Rinteenketo, R., & Zhang, Z. (2002). Fossil mammals resolve regional patterns of Eurasian climate variation during 20 million years. *Evolutionary Ecology Research*, 4(8), 1013-1016.
6. Graham, A. (2011). A natural history of the Central Asiatic deserts. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 98(1), 1-130. <http://dx.doi.org/10.2307/23028999>
7. Grimalt, J. O., & Targarona, J. (2017). Paleoclimate records from Central Asia and their implications for global climate changes. *Earth-Science Reviews*, 175, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.005>
8. Ivanov, D., Utescher, T., Mosbrugger, V., Syabryaj, S., Djordjević-Milutinović, D., & Molchanoff, S. (2011). Miocene vegetation and climate dynamics in Eastern and Central Paratethys (Southeastern Europe). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304(3–4), 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.07.006>
9. Jacques, F. M. B., Shi, G., Su, T., Zhou, Z., & Chen, W. (2011). Investigating the paleoclimate significance of fossil leaves using leaf physiognomy: A case study from the Miocene of Northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304(3-4), 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.12.012>
10. Kazhydromet. (2024). *Klimaticheskie kharakteristiki regionov Kazakhstana* [Climatic characteristics of Kazakhstan regions]. Retrieved from <https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/72/file/5ec145504ea54-oblast.pdf>
11. Kornilova, V. S. (1955). K kharakteristike flory Bolattamskikh sloev Turgaya [On the characteristics of the flora of the Bolattam layers of Turgai]. *Izvestiya AN KazSSR, Seriya*

- Biologicheskaya* [News of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, Biological Series], 9, 3-19.
12. Kornilova, V. S. (1956). Itogi izucheniya oligocenovoy flory Turgaya [Results of the study of the Oligocene flora of Turgai]. *Trudy Instituta botaniki AN KazSSR* [Proceedings of the Institute of Botany of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], 3, 59-101. Izdatel'stvo AN KazSSR [Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], Almaty.
 13. Kornilova, V. S. (1960). Nizhne-Miocenovaya flora Kushuka (Turgaisky progib) [Lower Miocene flora of Kushuk (Turgai depression)]. Izdatel'stvo Akademii nauk Kazakhskoy SSR [Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], Almaty, 3-19.
 14. Kornilova, V. S., & Lavrov, V. V. (1949). O nakhodkakh tretičnoy kserofitnoy flory v Turgaye i eë stratigraficheskom polozhenii [On the findings of the Tertiary xerophytic flora in Turgai and its stratigraphic position]. *Vestnik AN KazSSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], 5, 50.
 15. Kurlov, S. I., & Perezhogin, Yu. V. (2015). Iskopyemaya paleogen-neogenovaya flora Severnogo Turgaya (Tsentral'nyy Kazakhstan) [Fossil Paleogene-Neogene flora of Northern Turgai (Central Kazakhstan)]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State University], 10(185), 30-36.
 16. Liu, Yu-Sheng Christopher, et al. (2011). The evolution of Miocene climates in North China: Preliminary results of quantitative reconstructions from plant fossil records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304(3-4), 308-317. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.07.004>
 17. Mosbrugger, V., Utescher, T., & Dilcher, D. L. (2005). Cenozoic continental climatic evolution of Central Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(42), 15144-15149.
 18. Nigmatova, S., Zhamangara, A., Akmagambet, S., Madyarova, I., Abubakirova, N., Kashaganov, K., & Zadagali, A. (2023). Vozmozhnosti rekonstruktsii paleoklimata paleogena i neogena na osnove izucheniya iskopyemoy flory (na primere paleoflory reki Uly-Zhilanshik) [Possibilities of reconstructing the Paleogene and Neogene paleoclimate based on the study of fossil flora (on the example of the Uly-Zhilanshik River paleoflora)]. *Vestnik Evraziyskogo natsional'nogo universiteta im. L.N. Gumilyova, Seriya Khimiya, Geografiya, Ekologiya* [Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Series Chemistry, Geography, Ecology], 145(4), 71-82. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-145-4-71-82>
 19. Popova, S., Utescher, T., Averyanova, A., Tarasevich, V., Tropina, P., & Xing, Y. (2019). Early Miocene flora of Central Kazakhstan (Turgai Plateau) and its paleoenvironmental implications. *Plant Diversity*, 41(3), 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2019.04.002>
 20. Sun, J., Tada, R., Jia, J., Zheng, H., & Liu, X. (2010). Late Miocene desertification in the Tarim Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(35), 15446-15451. <https://doi.org/10.1073/pnas.1410890111>
 20. Tiffney, B. H., & Manchester, S. R. (2001). The fossil history of the Juglandaceae. *Brittonia*, 53(S1), 82-116.
 22. Utescher, T., Bruch, A., & Mosbrugger, V. (2024). The Palaeoflora Database - Documentation and Data. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10881069>
 23. Utescher, T., Bruch, A. A., Erdei, B., François, L., Ivanov, D., Jacques, F. M. B., et al. (2014). The coexistence approach – theoretical background and practical considerations of using plant fossils for climate quantification. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 410, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.05.031>
 24. Wang, P. X. (2009). Climate and sea-level changes during the past three million years. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 313-336.

25. Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686-693.
26. Zhamangara, A., Akmagambet, S., Nigmatova, S., Madyarova, I., Kashaganov, K., Zadagali, A., & Bayshashov, B. (2025). The Early Miocene Paleoclimate of Erzhilansay: Interpretation of Climatic Parameters Using Modern Methods. *Sustainability*, 17(1), 143. <https://doi.org/10.3390/su17010143>

Күшік мекенінің (Торғай ойпаты) ерте миоцен кезеңіндегі Coexistence Approach әдісі негізінде жүргізілген палеоклиматтық талдау

Айжан Жаманғара, Шахизада Ақмағамбет, Саида Нигматова

Аңдатпа. Бұл мақалада Орталық Азияда орналасқан Торғай ойпатының ерте миоценінің палеоклиматтық реконструкциясы ұсынылған. Зерттеу Coexistence Approach (CA) әдісін қолдануға және Құшық орнынан алынған палеофлоралық деректерді егжей-тегжейлі талдауға негізделген. Жұмыстың негізгі мақсаты - ерте миоцендегі климаттық параметрлерді қалпына келтіру және экожүйе өзгерістерін бағалау. Нәтижелер ерте миоцен климаты жылы-қоңыржай жағдайлармен, жұмсақ қыспен және жеткілікті жауын-шашынмен сипатталғанын көрсетеді. Жылдық орташа температура 14,2°C, ал жылдық орташа жауын-шашын 898,5 мм-ге жетті. Бұл жағдайлар әртүрлі орман экожүйелерінің дамуына ықпал етті. Аймақтың қазіргі климатымен салыстыру айтарлықтай айырмашылықты көрсетеді, бұл континентальдылықтың жоғарылауын көрсетеді. Алынған деректер жаһандық және аймақтық факторлардың әсерінен миоцендегі климаттың бірте-бірте салқындауы мен құрғауы туралы гипотезаны растайды. Зерттеу Орталық Азияның климаттық эволюциясын түсінуге айтарлықтай үлес қосады және CA әдісінің сенімділігін көрсетеді. Нәтижелер климаттық өзгерістерді модельдеу және неогендегі экожүйелерге климаттың әсерін бағалау үшін қолданылуы мүмкін. Болашақ зерттеулер климаттық және геологиялық факторлардың өзара әрекеттесуін, сондай-ақ аймақтың биоәртүрлілігіне климаттық өзгерістердің әсерін бағалауға бағытталған. Климаттық ауысымдар мен гидрологиялық режимдегі өзгерістерді көрсететін өсімдіктер құрамындағы өзгерістерді талдауға ерекше назар аударылады. Алынған деректер палеоклиматтық модельдерді нақтылауға және неогендегі биосфералық процестердің динамикасын қалпына келтіруге бағытталған одан әрі зерттеулер үшін негіз бола алады.

Түйін сөздер: ерте миоцен, Торғай ойпаты, палеоклиматтық реконструкция, қазіргі заманғы жақын аналогтар (NLR) әдісі

Палеоклиматический анализ раннего миоцена в местонахождении Кушук (Тургайская впадина) на основе метода совместного существования (Coexistence Approach)

Айжан Жаманғара, Шахизада Ақмағамбет, Саида Нигматова

Аннотация. В данной статье представлена палеоклиматическая реконструкция раннего миоцена для Тургайской впадины, расположенной в Центральной Азии. Исследование основано на применении метода Coexistence Approach (CA) и детальном анализе палеофлористических данных из местонахождения Кушук. Основная цель работы -

реконструкция климатических параметров и оценка изменений экосистем в раннем миоцене. Результаты показывают, что климат раннего миоцена характеризовался тепломерными условиями, мягкими зимами и достаточным количеством осадков. Среднегодовая температура составляла 14,2°C, а среднегодовое количество осадков достигало 898,5 мм. Эти условия способствовали развитию разнообразных лесных экосистем. Сравнение с современным климатом региона выявляет значительный контраст, указывая на усиление континентальности. Полученные данные подтверждают гипотезу о постепенном похолодании и аридизации климата в миоцене, вызванном глобальными и региональными факторами. Исследование вносит существенный вклад в понимание климатической эволюции Центральной Азии и демонстрирует надежность метода СА. Результаты могут быть использованы для моделирования климатических изменений и оценки влияния климата на экосистемы в неогене. Планируется, что будущие исследования будут направлены на изучение взаимодействия климатических и геологических факторов, а также на оценку влияния климатических изменений на биоразнообразие региона. Особое внимание уделяется анализу изменений в составе растительности, которые отражают климатические сдвиги и изменения в гидрологическом режиме. Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на уточнение палеоклиматических моделей и реконструкцию динамики биосферных процессов в неогене.

Ключевые слова: ранний миоцен, Тургайский прогиб, палеоклиматическая реконструкция, метод ближайших современных аналогов (NLR).

Современное состояние теплоэнергетической системы Республики Мордовия в условиях устойчивого развития

Андрей Пятанов¹, Ольга Переточенкова¹, Евгений Переточенков¹, Сергей Тесленок^{2,*}

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; rambler1999.super@yandex.ru, olga75geo@mail.ru, evg.white02@yandex.ru

²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия 2; teslenok-sa@mail.ru

*Корреспонденция: teslenok-sa@mail.ru

Аннотация: Рассмотрение истории формирования и развития, а также современное состояние теплоэнергетической системы любого региона играет важную роль для определения направлений и перспектив его дальнейшего развития. Это важно и актуально в связи с глобальными климатическими изменениями, а также позволяет выявить особенности географического распределения элементов теплоэнергетической системы и сложившиеся территориальные диспропорции в распределении элементов. Это и стало целью настоящего исследования применительно к территории Республики Мордовия.

На начало 2024 г. на территории региона работали 13 ТЭС и 1 малая ГЭС общей мощностью 434 МВт. Особенность развития энергосистемы – абсолютное доминирование одной станции, Саранской ТЭЦ-2. Также только на один г. Саранск приходится более 70 % всей выработки и потребления электроэнергии, что объясняется размещением крупных потребителей в городе и его черте, а также высокой (до половины жителей республики) концентрацией населения.

Установлена достаточно четкая и устойчивая тенденция к увеличению потребления электроэнергии. Для энергосистемы Мордовии характерны переход на использование природного газа в качестве основного топлива и достижение одного из самых высоких в стране (95%) уровней газификации и электрификации. Удельные величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади и электроэнергии на 1 человека уменьшились в большинстве районов, что связывается со снижением численности населения и частично – предположительно – с процессами глобального потепления при климатических изменениях и устойчивости энергетики.

Ключевые слова: теплоэнергетика; теплоэнергетическая система; история; формирование; состояние; устойчивое развитие; климат; потепление климата; Республика Мордовия

Цитирование: Пятанов, А., Переточенкова, О., Переточенков, Е., Тесленок, С. (2025). Современное состояние теплоэнергетической систем Республики Мордовия в условиях устойчивого развития. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 185-202.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-185-202>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 19.02.2025
Исправлена: 05.03.2025
Принята: 10.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Введение

Рассмотрение истории формирования и анализ современного состояние теплоэнергетической системы любого региона или территории играет важную роль для определения направлений и перспектив их дальнейшего развития. Последний момент особенно важен и актуален в связи с происходящими климатическими изменениями и вызванными ими процессами глобального потепления климата. Кроме того, появляется возможность для анализа особенностей пространственного размещения элементов теплоэнергетической системы, выявления и объяснения возможных территориальных диспропорций и определения мер по их преодолению.

В связи с этим, главной проблемой, рассмотрению которой посвящена данная статья, является анализ современного состояния теплоэнергетической системы Республики Мордовия. Соответственно, цель настоящего исследования заключается в выявлении истории формирования и развития теплоэнергосистемы Республики Мордовия, определении особенностей ее современного состояния и территориальных диспропорций в территориальном распределении ее элементов.

2. Материалы и методы

Для достижения целей исследования в качестве методов были использованы изучение и анализ литературных, картографических и интернет-источников, анализ статистических данных, официальных отчетов и публикаций отраслевых организаций и государственных органов, графические методы. Изучена актуальная литература, международные рейтинговые источники и научные работы в сфере теплоэлектроэнергетики, климатических изменений и устойчивому развитию. На основе исследованных материалов рассмотрены история формирования и выполнен анализ современного состояния теплоэнергетической системы Республики Мордовия в целом и применительно к ее отдельным элементам – в частности. Проанализированы особенности пространственного размещения элементов теплоэнергетической системы и электросетевых объектов (теплоэлектростанций, теплоэлектроцентралей, котельных, малых электростанций, электроподстанций, линий электропередачи), структура установленной мощности генерирующего оборудования в региональной энергосистеме, структура потребления электроэнергии по видам экономической деятельности, выявлены и объяснены территориальные диспропорций, предложены возможные меры по их преодолению. Важной частью исследования стало определение тепловой энергии на 1 м² жилой площади и удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека. Подобный многомерный подход дал возможность получить более полное представление о текущей ситуации, возможностях и направлениях совершенствования топливно-энергетического комплекса Республики Мордовия в контексте устойчивого энергетического будущего.

3. Результаты

Зарождение энергетики в Мордовии началось еще в конце XIX в. С исторической точки зрения первые электростанции в Саранске и Арапово (ныне г. Ковылкино) появились раньше, чем в среднем по России. Традиционно первые электростанции вырабатывали небольшое количество электроэнергии и предназначались для обеспечения уличного освещения и работы предприятий с высокой долей электрификации производства того исторического периода. К 1918 г. на территории современной Мордовии функционировали 6 электростанций общей мощностью 156 кВт.

Основное развитие теплоэнергетика республики получила после принятия плана ГОЭЛРО. Первым действительно крупным объектом теплоэнергетики того времени стала Саранская ТЭЦ-1. В 1933 г. состоялся пуск ее первой турбины мощностью 600 кВт. Уже через два года запустили вторую турбину на 1 500 кВт. Ввод в эксплуатацию данной

электростанции послужил толчком к развитию городского централизованного теплоснабжения. Общая тепловая мощность Саранской ТЭЦ-1 оценивалась в 120 Гкал/час.

Довольно активно развивалась и децентрализованная энергетика. Это было связано с «проблемностью» сельских территорий. Здесь проживала основная часть населения, но обеспечивать энергией такие территории было экономически нецелесообразно и технологически трудно. Сельские территории растягивались на значительные расстояния, вопросы тепло- и электроснабжения решались возведением локальных источников энергии, например, строительством ветряных и водяных мельниц (Громов и др., 2022; Громов и др., 2023; Переточенкова, Пятанов, 2023).

В период после Великой Отечественной войны роль городов, как главной производительной силы, была многократно увеличена. Множество крупных предприятий страны, эвакуированных в военное время, было решено оставить в местах эвакуации, а на их прежнем месте построить новые. Спрос на рабочие руки подтолкнул развитие процесса урбанизации, а эвакуированные предприятия стали своего рода «градоразвивающими» и потребовали серьезного увеличения энергопотребления.

В 1958 г. была запущена первая турбина крупнейшего энергетического объекта региона – Саранской ТЭЦ-2. Ее мощность составляла 25 МВт. Теплоэлектроцентраль неоднократно расширялась: в эксплуатацию были запущены новые турбоагрегаты, паровые и водогрейные котлы. В 1999 г. самые старые турбины были заменены на одну новую, суммарно превышающую общую мощность изношенных агрегатов. Установленная тепловая мощность ТЭЦ-2 составила 744 Гкал/ч (горячая вода – 704 Гкал/ч и пар – 40 Гкал/ч). Энергия станции отпускается в виде сетевой воды для отопления и горячего водоснабжения для предприятий и жилых домов четырех районов города.

В 1981 г. Саранская ТЭЦ-1 прекратила свое существование спустя почти полвека эксплуатации. Изношенные турбины были демонтированы, и некогда крупнейшая теплоэлектроцентраль превратилась в небольшую котельную, которая обеспечивает теплом и паром близлежащие дома (Переточенкова, Пятанов, 2022; Переточенкова, Пятанов, 2023).

Если говорить о территориальных диспропорциях, то на г. Саранск приходится более 70 % всей выработки и потребления электроэнергии в республике. Это можно объяснить расположением крупных предприятий Мордовии непосредственно в городе и его черте, а также высокой концентрацией населения. В городском округе Саранск на начало 2023 г. проживало 45 % всего населения республики (347 тыс. из 771 тыс. чел.). Сюда же можно отнести концентрацию высокую концентрацию промышленных предприятий.

На начало 2024 г. на территории региона эксплуатировались 13 тепловых и 1 малая гидроэлектростанция общей мощностью 434 МВт (таблица 1). Так как Республика Мордовии газифицирована на более чем 99%, все теплоэлектростанции используют в качестве основного топлива природный газ (со всеми его преимуществами (Gielen, Bazilian, 2021; Bugaje et al., 2022)), а главное оборудование представлено газопоршневыми и газотурбинными агрегатами.

Таблица 1. Тепловые и электрические станции в Республике Мордовия (составлено авторами по (Электростанции..., 2024))

Название	Населенный пункт	Установленная мощность станции (МВт)	Фактическая выработка электроэнергии (млн. кВт*ч)	Тепловая мощность (Гкал/ч)
Саранская ТЭЦ-2	г. Саранск	280,00	1 070,0	744,0
ПГЭС Мордовцемент	п. Комсомольский	73,00	373,50	61,0
Саранская ГТ-ТЭЦ	г. Саранск	18,00	99,10	80,0
ЭС АО «Тепличное»	г. о. Саранск	16,60	77,40	-
Ромодановская ТЭЦ-4	п. Ромоданово	12,00	28,60	41,70
ЭС ООО «Энергоцентр Сура»	п. Чамзинка	6,90	28,30	-
ЭС АО «Мир цветов»	п. Кадошкино	6,00	27,30	-
ЭС АО «Мир цветов РМ»	п. Кадошкино	6,00	7,50	-
ГТЭС Явасская	п. Явас	5,00	5,50	-
ЭС ООО «ЭМ-ПЛАСТ»	г. Саранск	4,40	8,40	-
ЭС ООО МПК «Атяшевский»	п. Атяшево	4,30	31,90	-
ЭС ООО «Саранскабель-Оптика»	г. Саранск	0,80	2,60	-
ЭС АО «Саранский комбинат макаронных изделий»	г. о. Саранск	0,50	1,10	-
Токмовская МГЭС	с. Токмово	0,32	-	-

Стоит отметить, что в настоящее время главная особенность и результат развития энергосистемы региона заключается в абсолютном доминировании одной единственной станции над другими. Речь идет о Саранской ТЭЦ-2. На ее долю приходится порядка 70% всей установленной мощности (рисунок 1) и более 60% выработки электроэнергии во всем регионе.

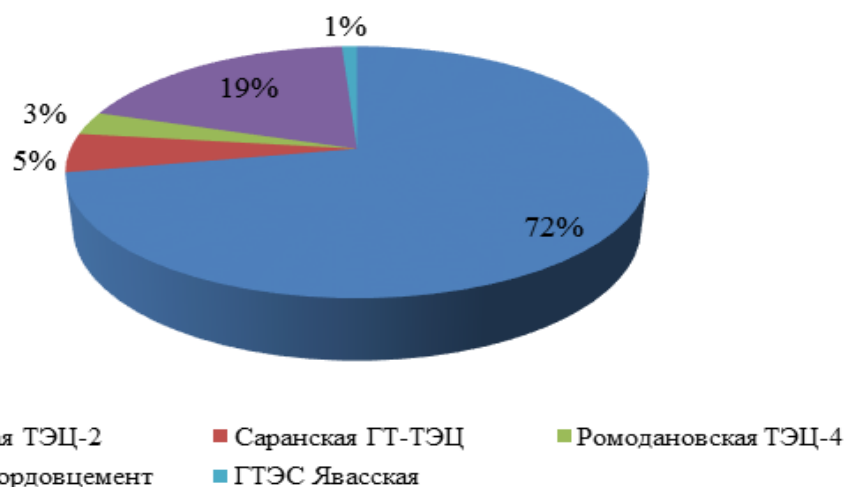


Рисунок 1. Структура установленной мощности генерирующего оборудования в энергосистеме Республики Мордовия за 2023 год (составлено авторами по (Электростанции..., 2024))

Изучая структуру потребления электроэнергии по видам экономической деятельности (рисунок 2) можно отметить следующие особенности:

– основное потребление приходится на обрабатывающее производство, однако его доля за последние 5 лет сократилась – с 35,6 до 32,3%;

– продолжает расти потребление энергии в сельском хозяйстве, что подтверждается расширением производственных мощностей в планах развития сельскохозяйственных предприятий;

– транспорт, связь и торговля стагнируют, попеременно то прибавляя, то теряя по 1–1,5 % ежегодно;

– строительство, несмотря на энергичные темпы, сокращает потребление энергии после пика активной стройки к 21-му чемпионату мира по футболу ФИФА 2018 г., одним из городов-участников которого являлся Саранск, – с 1,4 до 0,8 %.

Население, как группа потребителей, увеличивает использование электрической энергии, что связано как с количественным ростом единицы потребления электроэнергии на человека, так и с процессами ускоренной цифровизации. У каждого человека сегодня имеется не одно, а несколько цифровых устройств – смартфон, планшет, компьютер, устройства «умного дома», происходит цифровизация электробытовых приборов и т. п., суммарно потребляющих дополнительные объемы электроэнергии.



Рисунок 2. Структура потребления электроэнергии по видам экономической деятельности в Республике Мордовия за 2023 г. (составлено авторами по (Электростанции..., 2024))

В целом потребление электроэнергии в Мордовии растет не быстрыми темпами, но тенденция к увеличению прослеживается достаточно четко и устойчиво. Темпы прироста – в среднем 1% к предыдущему году. Основными потребителями электроэнергии в регионе среди крупных предприятий являются филиал «РЖД» – Куйбышевская железная дорога, АО «Мордовцемент», АО «Тепличное» и ООО «ВКМ-Сталь».

Следом идут также достаточно большие предприятия региона, однако в потреблении энергии они уступают лидерам в 4–10 раз – ООО «Ромодановосахар», АО «Мир цветов»,

ПАО «Электровыпрямитель», ООО МПК «Атяшевский», ОАО Саранский завод «Резинотехника» и др. К основным перспективным потребителям электроэнергии в регионе можно отнести тепличные комплексы предприятий «Тепличное» и «Мир цветов», а также агрофирму «Октябрьская». Кроме того, введение в эксплуатацию универсального зала «Огарёв–Арена» в г. Саранске предполагает использование порядка 4,3 МВт дополнительной электрической мощности (Реализация..., 2020; Громов и др., 2022; Громов и др., 2023).

Энергосистема Республики Мордовия является частью Объединенной энергосистемы Средней Волги (ОЭС Средней Волги) (Единая..., 2021; ОЭС..., 2023) и находится под региональным управлением и в ведении системного оператора – Пензенского регионального диспетчерского управления. Энергетическая система региона связана с энергосистемами Нижегородской, Пензенской и Рязанской областей, а также Чувашской Республики воздушными линиями электропередачи (высоковольтными линиями, ВЛ) общей протяженностью, составляющей на своей территории 2 625 км.

Стоит отметить, что через территорию Мордовии не проходит ни одна высоковольтная линия электропередач напряжением более 220 кВ. При этом в ОЭС Средней Волги существуют воздушные линии сверхвысокого класса напряжения в 500 кВ. Они огибают территорию республики с севера (в Нижегородской области ВЛ 500 кВ «Осиновка – Арзамасская») и с юга (в Ульяновской и Пензенской областях ВЛ 500 кВ «Вешкайма – Пенза-2»).

Энергосистема региона включает в себя 121 подстанцию разного класса напряжения, некоторые из которых представлены на рисунке 3. Необходимо отметить, что для детального выявления закономерностей размещения отдельных элементов региональной теплоэнергетической системы и получения полной картины необходимо выполнение соответствующего картографирования и моделирования, а также проведение геоинформационно-картографического пространственного анализа (Тесленок, Тесленок, 2013; Тесленок и др., 2016; Bellamy et al., 2022). Пока имеющиеся материалы (Единая..., 2021; Министерство..., 2022; Электростанции..., 2024) позволяют сделать общий вывод только о достаточно равномерном размещении по территории региона электрических подстанций (см. рисунок 3). При этом можно отметить, что в западной части республики преобладают подстанции с напряжением 110 кВ, а на востоке – 35 кВ (см. рисунок 3).

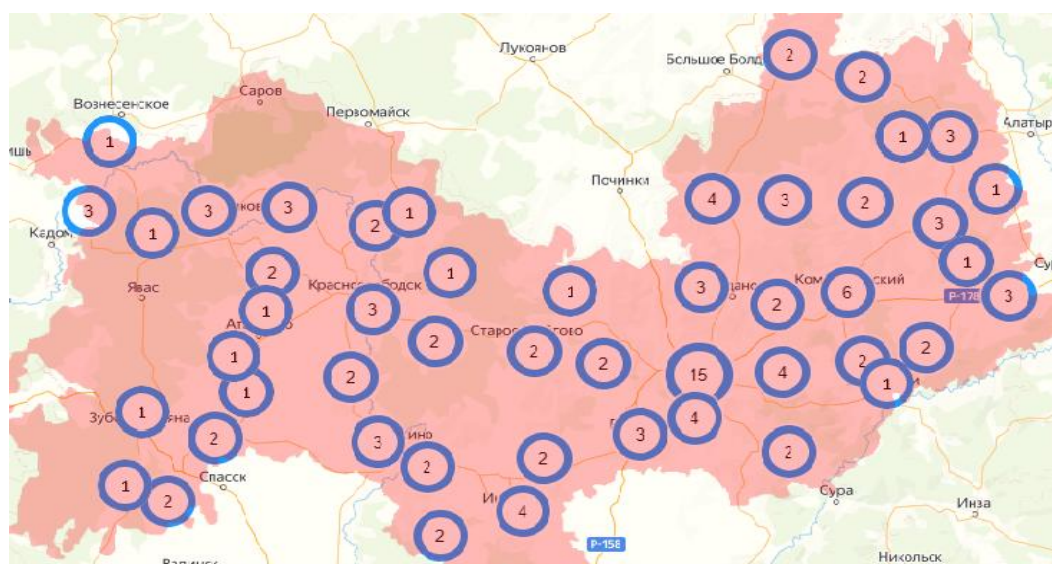


Рисунок 3. Расположение электрических подстанций на территории Мордовии (Единая..., 2021; Министерство..., 2022)

На территории республики функционируют пять электросетевых объектов с напряжением 220 кВ. Эти подстанции являются составной частью Объединенной энергосистемы и принадлежат филиалу Магистральные электрические сети Волги (МЭС Волги) (ОЭС..., 2023) одного из крупнейших в мире и самого крупного в России электросетевых холдингов (обеспечивающего электроснабжение потребителей в 82 регионах страны) – Публичному акционерному обществу «Федеральная сетевая компания–Россети» (ранее – ПАО «ФСК ЕЭС») (Единая..., 2021; Об утверждении..., 2022). К ним относятся следующие ПС 220 кВ (годы ввода в эксплуатацию):

- Саранская (1973, 1977);
- Центролит (1988, 2012);
- Рузаевка (2010, 2011);
- Комсомольская (1986);
- Мокша (1992).

В целом теплоэнергосистема Республики Мордовия решила несколько стратегических задач в направлении устойчивого развития.

Во-первых, тепловые электростанции региона потребляют природный газ как основное топливо, несомненно, обладающее хорошими перспективами и в будущем (Gielen, Bazilian, 2021; Bugaje et al., 2022). Этого удалось добиться благодаря строительству магистральных газопроводов, например, таких как «Саратов–Горький». Благодаря им теплоэлектроцентрали Мордовии отказались от сжигания угля и мазута, которые оказывали негативное влияние на экологическое состояние региона (особенно в условиях потепления климата) (Тесленок и др., 2012; Ивлиева, 2013; Тесленок и др., 2015; Беспалова, Тесленок, 2019) и здоровье населения. Повышение устойчивости теплоэлектроэнергетики в условиях регионального проявления проблемы глобальных климатических изменений (Грин, 2023; Грин, 2023; Мухамедиева и др., 2023) играет важную роль, снижая объемы выбросов парниковых газов в результате сжигания других видов углеводородного топлива (Громов и др., 2022; Министерство..., 2022; Jesse et al., 2024). Но, не смотря на значительное сокращение экономических издержек, республика не обладает собственными минерально-сырьевыми энергоресурсами. А анализ балансов реактивной мощности энергосистемы Мордовии показывает ее энергодефицитность и зависимость в получении электроэнергии из смежных энергосистем. Все эти факторы, а также износ фондов (теплового оборудования, тепло- и электросетей и др.) негативно влияют на тарифообразование в регионе, когда в последнее время цены на энергию стали одними из самых высоких в Приволжском федеральном округе (Тарифы, 2023).

Во-вторых, в течение достаточно короткого времени (с 1960 по 1970 гг.) была проделана огромная работа по электрификации и газификации всех районов Республики Мордовия, особенно – сельской местности. Электрификация Лямбирского и Ромодановского районов завершилась в 1960 г., Темниковского – в 1962 г., Атяшевского, Кочкуровского, Ичалковского, Краснослободского, Дубенского, Большеберезниковского и Большеигнатовского – в 1964 г. В 1967 г. все крупные сельскохозяйственные предприятия региона были подключены к Мордовской энергосистеме. В то время это было особенно актуально, потому что большая часть населения проживала именно в сельской местности. Таким образом, если в 1960 г. к электросетям было подключено 224 населенных пункта (47 778 домов), то через 10 лет их число выросло уже до 1 394 населенных пунктов (145 706 домов).

Парадоксально, но одновременно с процессами развития сельских территорий за счет электрификации и газификации возникла масштабная миграция населения из села в город, и сокращение сельского населения последовательно приводило к уменьшению числа сельских населенных пунктов (Логонова и др., 2018) (таблица 2). Энергоснабжение сельских населенных пунктов с высокой территориальной дисперсностью является высоко затратным и экономически малоэффективным. Ко всему этому добавляется постоянный отток сельского населения в города (Segales et al., 2023), из-за чего потребителей тепло- и электроэнергии на селе становится еще меньше.

Таблица 2. Динамика сельского населения и расселения в Республике Мордовия (Логинова и др., 2018)

Год	Численность сельского населения, тыс. чел.	Количество сельских населенных пунктов	Плотность населения, чел/км ²
1939	1 098	2 542	45,8
1970	657	1 813	39,5
1979	525	1 485	37,9
1989	419	1 377	36,9
2002	365	1 284	34,1
2024	278	1237	29,3

С одной стороны, электрификация сельских населенных пунктов Мордовии, благодаря строительству линий электропередачи, повлекла за собой улучшение качества жизни сельского населения. С другой стороны, масштабное распространение ВЛ привело к ненужности развивать объекты локальной энергетики в отдаленных районах республики. Закрытие локальных энергетических объектов в сельской местности повлекло за собой сокращение рабочих мест и, как следствие, развитие процессов миграции в городскую черту (Segales et al., 2023).

Атаев, З.А. считает, что перспективными для энергоснабжения являются сельские поселения с численностью населения более 1 тыс. человек (Атаев, 2008). Таких населенных пунктов в регионе порядка пятидесяти (Логинова и др., 2018). В связи с этим стоит поднять вопрос о целесообразности возвращения к развитию объектов локальной энергетики в отдаленных районах Мордовии, в том числе в современных условиях и с использованием возобновляемых источников энергии (Sagar et al., 2023). В настоящее время объемы потребления электроэнергии в сельской местности стабильно повышаются. Также можно отметить сдвиг в глобальных процессах, а именно развитие процессов деурбанизации и субурбанизации.

В таблице 3 представлена динамика удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади в разрезе районов Мордовии. Полученные данные свидетельствуют о некотором сокращении величины потребления тепловой энергии. Оно может быть вызвано многими факторами и причинами. Самой очевидной среди них является снижение численности населения, вызванной миграционными и урбанизационными процессами.

Также снижение потребления тепловой энергии могло произойти по причине капитального ремонта объектов теплоэнергетики и, как результата, повышения их эффективности или в результате непосредственного сокращения жилой площади за счет, например, признания жилья аварийным.

Относительно стабильная в этом плане ситуация отмечается в Ардатовском, Зубово-Полянском, Инсарском и Теньгушевском муниципальных районах Мордовии. В них отмечается крайне незначительный среднегодовой рост потребления тепловой энергии и увеличения площади жилищного фонда на 1–2%. В результате показатель удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади здесь остался неизменным (см. таблицу 3).

Таблица 3. Динамика удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади в разрезе муниципальных образований Республики Мордовия (составлено авторами)

Муниципальные образования	Потребление тепловой энергии, Гкал		Площадь жилищного фонда, тыс. м ²		Удельная величина потребления тепловой энергии на 1 м ² жилой площади, Гкал/1 м ²	
	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.
Ардатовский район	154 728	155 757	736,8	741,7	0,21	0,21
Атяшевский район	81 237	75 756	624,9	631,3	0,13	0,12
Зубово-Полянский район	152 911	153 736	1 390,1	1 397,6	0,11	0,11
Инсарский район	48 672	48 880	374,4	376,0	0,13	0,13
Кадошкинский район	49 818	34 896	216,6	218,1	0,23	0,16
Ковылкинский район	184 800	174 465	1 155,0	1 163,1	0,16	0,15
Краснослободский район	134 708	127 376	792,4	796,1	0,17	0,16
Лямбирский район	162 214	159 728	954,2	998,3	0,17	0,16
Рузаевский район	236 684	307 728	1 690,6	1 709,6	0,14	0,18
Темниковский район	99 720	89 312	554,0	558,2	0,18	0,16
Теньгушевский район	40 027	40 820	307,9	314,0	0,13	0,13
Торбеевский район	75 413	70 452	580,1	587,1	0,13	0,12
Чамзинский район	125 468	108 384	896,2	903,2	0,14	0,12
г. о. Саранск	1 300 395	1 489 115	8 669,3	8 759,5	0,15	0,17

Интересная ситуация выявлена в Атяшевском, Кадошкинском, Ковылкинском, Краснослободским, Лямбирским, Темниковским, Торбеевским и Чамзинском муниципальных районах. Здесь потребление тепловой энергии сокращается, однако площадь жилищного фонда увеличивается. В результате удельная величина потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади падает на 0,01–0,02 (см. таблицу 3). Самое крупное падение данного коэффициента за год зафиксировано в Кадошкинском районе – с 0,23 до 0,16 (см. таблицу 3).

Сокращение данного показателя указывает на уменьшение энергопотребления, но при этом причины, из-за которых произошло сокращение потребления, могут быть самыми разными. Одно дело, когда речь идет о применении энергосберегающих технологий в теплоэнергетике. Другое дело, когда сокращение потребления энергии произошло на фоне закрытия промышленных предприятий или уменьшения численности населения. Увеличение жилой площади также приведет к уменьшению данного показателя, при том, что потребление энергии останется на том же уровне.

Очевидно, что отток населения из сельских районов Мордовии играет главную роль в снижении потребления тепловой энергии. Несмотря на это, в этих районах республики продолжается строительство и ввод новых жилых площадей, что еще больше снижает удельную величину потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади.

В наилучшем варианте этот процесс должен осуществляться в рамках реализации муниципальными властями положительного сценария стратегии регионального развития территории. В противном случае может повториться печальный опыт прошлого, когда в Мордовии провели активную электрификацию множества сельских населенных пунктов, а люди стали уезжать в городские поселения.

4. Обсуждение

Результаты выполненного анализа показали, что огромная электроэнергетическая инфраструктура, ранее созданная в сельской местности, в настоящее время оказалась невостребованной, а ее эксплуатация и содержание – экономически невыгодными. Все же увеличение удельной величины тепловой энергии на 1 м² жилой площади было зафиксировано, и оно касается двух муниципальных образований республики: в г. о. Саранск и в Рузаевском районе. Города Саранск и Рузаевка вовлечены в активные агломерационные процессы, результатом которых становится повышение производительности труда и экономической эффективности. Потребление тепловой энергии в этих муниципальных образованиях увеличилось в среднем на 20 % за год (см. табл. 3).

Низкая энергетическая база 2020 г., как результат коронавирусных ограничений (D’Orazio, P., 2023; Обзор..., 2024), сыграла существенную роль в снижении энергопотребления в регионе. Помимо этого, темпы активного строительства жилых площадей не замедлялись. Таким образом, показатель удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади возрос на 0,02–0,04 (см. таблицу 3).

Активнее всего развивается Рузаевский район. В этом ему помогает крупный железнодорожный узел, который соединяет транспортные потоки в направлении «Запад–Восток» и «Север–Юг». Относительная близость к рынкам сбыта и наличие крупных промышленных предприятий вблизи железнодорожного узла позволяет использовать все свои транзитные возможности для повышения экономического благосостояния района.

Вторая часть выполненного исследования схожа по методике выполнения с первой и представляет собой вычисление удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека (таблица 4). Было необходимо рассчитать, каково потребление электроэнергии (кВт*ч) на одного человека в год. Проведенный анализ показал неудовлетворительные результаты. Численность населения снизилась во всех исследуемых муниципальных образованиях Мордовии и произошло его старение. Из-за этого практически во всех муниципальных районах показатель удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека сократился.

Таблица 4. Динамика удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека в разрезе районов Республики Мордовия (составлено авторами)

Муниципальное образование	Потребление электроэнергии, млн. кВт*ч		Численность населения, тыс. чел.		Удельная величина потребления электроэнергии на 1 человека, кВт*ч/чел.	
	2020 г.	2024 г.	2020 г.	2024 г.	2020 г.	2024 г.
Ардатовский район	11,0	10,8	24,0	23,5	460,3	458,4
Атяшевский район	7,7	7,4	16,5	16,1	467,9	460,0
Зубово-Полянский район	28,7	28,4	53,6	53,0	536,0	535,9
Инсарский район	6,8	6,6	11,5	11,2	591,0	591,0
Кадошкинский район	3,8	3,7	6,4	6,2	601,2	595,4
Ковылкинский район	13,2	12,7	36,7	36,0	360,0	355,0
Краснослободский район	14,4	14,1	22,3	21,9	644,7	645,3
Лямбирский район	17,9	17,7	33,7	33,3	532,0	531,0
Рузаевский район	37,0	37,5	61,5	60,6	601,9	619,6
Темниковский район	6,5	6,8	13,0	12,6	503,0	539,0
Теньгушевский район	8,1	8,0	9,7	9,6	835,0	830,0
Торбеевский район	11,1	11,1	18,3	18,2	609,0	608,0
Чамзинский район	12,6	13,6	29,5	29,1	427,0	467,0
г. о. Саранск	207,3	199,6	349,8	346,2	592,6	576,5

Это связано, в том числе и с повышением смертности в результате пандемии коронавирусной инфекции в эти годы (Муштайкин и др., 2022; Муштайкин и др., 2022; D’Orazio, P., 2023).

Только Темниковский, Рузаевский и Чамзинский районы стали единственными муниципальными образованиями, где потребление электроэнергии было увеличено. Рост потребления электроэнергии в этих районах составил от 0,3 до 1,0 млн. кВт*ч (см. таблицу 4). Таким образом, даже с учетом снижения численности населения и изменения его возрастной структуры (старения) в названных районах Республики Мордовия, удельная величина потребления электроэнергии на 1 человека все же увеличилась. Наибольший прирост отмечается в Чамзинском районе – с 427 до 467 кВт*ч на человека.

Можно, предположить, что выявленное уменьшение показателей удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади и удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека частично может быть обусловлено и влиянием доказанных для исследуемого региона (Ивлиева, 2013; Тесленок и др., 2015; Беспалова, Тесленок, 2019) и других территорий (Тесленок и др., 2012; Тесленок и др., 2015) процессами потепления климата (особенно ярко выраженными в зимний сезон с отопительным периодом), вызванными глобальными климатическими изменениями (Lindbergh et al., 2022).

Необходимо отметить, что вопрос подобной взаимосвязи и зависимости нуждается в дополнительном серьезном и основательном изучении. И по-прежнему актуальной для региона остается задача, характерная как для других субъектов Российской Федерации, так и для других стран – дальнейшее развитие и совершенствование теплоэнергетической системы как важной составной части топливно-энергетического комплекса в целом (Robinson et al., 2022; Bossink et al., 2023) с целью достижения устойчивого экологического и энергетического будущего (Bellamy et al., 2022; Грин, 2023; Мухамедиева и др., 2023; Matraeva, 2022; Perera et al., 2023; Jesse et al., 2024; Tao et al., 2024).

5. Заключение

Таким образом, на начало 2024 г. на территории Республики Мордовии эксплуатировались 13 тепловых электростанций и 1 малая ГЭС общей мощностью 434 МВт. Особенность развития энергосистемы региона заключается в доминировании одной станции над другими. Если говорить о территориальных диспропорциях, то на г. Саранск приходится более 70% всей выработки и потребления электроэнергии в республике. Потребление электроэнергии в Мордовии растет не быстрыми темпами, но тенденция к увеличению прослеживается довольно четко и устойчиво. Энергосистема Республики Мордовия является частью Объединенной энергосистемы Средней Волги.

Энергосистема Мордовии включает в себя 121 подстанцию разного класса напряжения. В целом энергосистема Республики Мордовия решила для себя несколько стратегических задач: переход на использование природного газа в качестве основного топлива, а также достижение одного из самых высоких уровней газификации и электрификации в стране – 95 %. К основным перспективным потребителям электроэнергии в регионе можно отнести тепличные комплексы предприятий «Тепличное» и «Мир цветов», а также агрофирму «Октябрьская».

Также необходимо отметить, что удельная величина потребления тепловой энергии на 1 м² жилой площади и удельная величина потребления электроэнергии на 1 человека – уменьшились в большинстве районах Мордовии. Основной причиной является снижение численности населения и его старение. Оно произошло из-за увеличения смертности населения в ковидные годы, а также постоянных миграционных процессов в другие регионы страны (прежде всего Москву и Московскую область). Миграционные процессы в Республике Мордовия происходят из-за низкой оплаты труда, сокращения рабочих мест, закрытия производств, а также желания людей улучшить качество жизни. Возможно, уменьшение показателей удельной величины потребления тепловой энергии на 1 м² жилой

площади и удельной величины потребления электроэнергии на 1 человека частично связано с доказанными и для исследуемой территории процессами потепления климата (особенно ярко выраженными именно в зимний сезон с отопительным периодом), вызванными глобальными климатическими изменениями. Однако этот вопрос требует дополнительного глубокого изучения в условиях необходимости достижения целей устойчивого развития.

Приволжский федеральный округ в целом и Республика Мордовия, как его составная часть, характеризуются наличием ряда проблем в развитии тепловой энергетики. Они не имеют регионального характера, так как они сравнимы с общими проблемами развития теплоэнергетики в России. К наиболее острым из них можно отнести устаревание основных фондов, высокую задолженность потребителей по оплате услуг (и, как следствие, понижение инвестиционной привлекательности), невозможность электростанций выдавать полную мощность в связи с причинами различного характера (начиная от отсутствия технической возможности и заканчивая отсутствием необходимости в этом), экологические проблемы и другие. В результате, для прохождения очередного энергоперехода, необходимо иметь надежную энергетическую основу, которой в настоящее время и является тепловая энергетика. Для повышения энергоэффективности и снижения объемов потребления ископаемого топлива необходимо использовать новые децентрализованные системы теплоснабжения – индивидуальные системы отопления и горячего водоснабжения. В результате векторы стратегического развития электроэнергетики Республики Мордовия ориентированы на будущее.

В республике имеются заделы для внедрения новых эффективных технологий тепловой энергетики. Основными перспективными направлениями развития теплоэнергетики в Мордовии являются инновационное техническое перевооружение, интеграция территориальных систем Приволжского и Уральского федеральных округов для повышения стабильности и надежности региональных энергосистем и внедрение новейших технологий, связанных с решением проблем в экологической сфере, а также снижение себестоимости энергии, повышение энергоэффективности и энергосбережения в условиях устойчивого развития. Тепловые электростанция XX в. с экономической точки зрения оказываются ничуть не хуже (а в ряде случаев, даже лучше) в сравнении с современными «зелеными» электростанциями, которые стали поспешно внедрять в массовый оборот, при этом одновременно признавая недостаточными объемы проведения научно-исследовательских работ и научных и опытно-конструкторских разработок данной тематики и соответствующей направленности. Внедрение новых технологий безусловно потребует значительных капиталовложений. Помимо монетарной составляющей, для устойчивой работы и обслуживания новых электростанций потребуются локализация их производства, высококвалифицированные рабочие и научные кадры, а также современные технологические и инновационные устройства и материалы.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, А.П. и Е.П.; методология, О.П. и С.Т.; исследование, А.П. и Е.А.; ресурсы, А.П. и Е.П.; курирование данных, О.П.; написание – подготовка оригинального черновика, А.П. и Е.П.; написание – рецензирование и редактирование, С.Т. и О.П.; визуализация, А.П.; руководство, С.Т.

8. Информация об авторе

Пятанов Андрей Владимирович – аспирант, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, rambler1999.super@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6999-6460>

Переточенков Евгений Алексеевич – магистрант Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, evg.white02@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9530-7273>

Переточенкова Ольга Усмановна - кандидат географических наук, доцент кафедры физической и социально-экономической географии, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, olga75geo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2222-9209>

Тесленок Сергей Адамович - кандидат географических наук, доцент Высшей экологической школы ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», заведующий лабораторией геоинформатики и мониторинга природных ресурсов. Ханты-Мансийск, Россия, teslserg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6691-3724>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности: отсутствуют.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Ataev, Z. A. (2008). *Geograficheskie osnovy lokal'noi energetiki Tsentral'nogo ekonomicheskogo raiona Rossii*: monografiia [Geographical Foundations of Local Energy in the Central Economic Region of Russia: Monograph]. Ryazan.
2. Bellamy, R., Chilvers, J., Pallett, H., & Hargreaves, T. (2022). Appraising sociotechnical visions of sustainable energy futures: A distributed deliberative mapping approach. *Energy Research and Social Science*, 85, 102414. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102414>
3. Bepalova, N. V., & Teslenok, S. A. (2019). *Analiz osobennostei izmeneniia srednei mnogoletnei temperatury vozdukha po sezonam goda na territorii Respubliki Mordoviia* [Analysis of Long-term Average Air Temperature Changes by Seasons in the Republic of Mordovia]. In XLVII Ogarevskie chteniia. Materialy nauchnoi konferentsii [XLVII Ogarev Readings. Conference Proceedings] (Vol. 2, pp. 374–379). Saransk.
4. Bossink, B., Blankesteijn, M. L., & Hasanefendic, S. (2023). Upscaling sustainable energy technology: From demonstration to transformation. *Energy Research and Social Science*, 103, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103208>
5. Bugaje, A. B., Dioha, M. O., Abraham-Dukuma, M. C., & Wakil, M. A. (2022). Rethinking the position of natural gas in a low-carbon energy transition. *Energy Research and Social Science*, 90, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102604>
6. D’Orazio, P. (2023). Charting the complexities of a post-COVID energy transition: Emerging research frontiers for a sustainable future. *Energy Research and Social Science*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103365>
7. Edinaia energeticheskaia sistema Rossii [Unified Energy System of Russia]. (2021). System Operator of the Unified Energy System: Official Website. <https://www.soups.ru/functioning/ups/ups2021/>
8. Elektrostantsii Respubliki Mordoviya [Power Plants of the Republic of Mordovia]. (2024). EnergyBase. <https://energybase.ru/region/respublika-mordoviya/power-plants>
9. Gielen, D., & Bazilian, M. D. (2021). Critically exploring the future of gaseous energy carriers. *Energy Research and Social Science*, 79, 102185. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102185>
10. Green, E. (2023, December 12). Ustoichivaia energetika i izmenenie klimata [Sustainable Energy and Climate Change]. Sigma Earth. <https://sigmaearth.com/ru/устойчивая-энергетика-и-изменение-климата/>

11. Green, E. (2023). Tekhnologii ustoichivoi energetiki v 2024 godu [Sustainable Energy Technologies in 2024]. Sigma Earth. <https://sigmaearth.com/ru/технологии-устойчивой-энергетики-в-2024-году/>
12. Gromov, D. V., Kochurov, B. I., Peretochenkova, E. A., Peretochenkova, O. U., & Pyatanov, A. V. (2023). Teploenergeticheskii rynek Privolzhskogo federal'nogo okruga [Heat Energy Market of the Volga Federal District]. Ogarev-online, <https://journal.mrsu.ru/arts/teploenergeticheskij-rynok-privolzhskogo-federalnogo-okruga>
13. Gromov, D. V., Peretochenkova, O. U., & Pyatanov, A. V. (2022). Innovatsii v energetike v regionakh Privolzhskogo federal'nogo okruga [Innovations in Energy in the Regions of the Volga Federal District]. Ogarev-online, 2. https://journal.mrsu.ru/wp-content/uploads/2022/03/statya_pyatanov-gromov-peretochenkova-3.pdf
14. Ivlieva, N. G., Manukhov, V. F., & Khlevina, S. E. (2013). Prostranstvenno-vremennoi analiz izmeneniia klimata v zone shirokolistvennykh lesov pravoberezh'ia Volgi [Spatio-temporal Analysis of Climate Change in the Broadleaf Forest Zone of the Right Bank of the Volga]. *InterCarto/InterGIS*, 19, 62–68. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2013-1-19-62-68>
15. Jesse, B. J., Kramer, G. J., & Koning, V. (2024). Characterization of necessary elements for a definition of resilience for the energy system. *Energy, Sustainability and Society*, 14, 46. <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00478-9>
16. Lindbergh, S., He, Y., & Radke, J. (2022). Beyond carbon: Unveiling vulnerabilities of the transportation fuel system for climate resilience. *Energy Research and Social Science*, 114, 103585. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103585>
17. Loginova, N. N., Maslyaev, M. V., & Maslyaev, V. N. (2018). Sistema energosnabzheniia sel'skoi mestnosti Mordovii: ekonomiko-geograficheskie aspekty [Energy Supply System of Rural Areas in Mordovia: Economic and Geographical Aspects]. *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiia* [Modern Problems of Territorial Development], 1. <https://terjournal.ru/wp-content/uploads/2018/02/ID31.pdf>
18. Matraeva, L., Vasiutina, E., Korolkova, N., Maloletko, A., & Kaurova, O. (2022). Identifying rebound effects and formulating more sustainable energy efficiency policy: A global review and framework. *Energy Research and Social Science*, 85, 102402. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102402>
19. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. (2022). Gosudarstvennyi doklad "O sostoianii energosberezheniia i povyshenii energeticheskoi effektivnosti v Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu" [State Report "On the State of Energy Saving and Improving Energy Efficiency in the Russian Federation in 2021"]. https://www.economy.gov.ru/material/file/5a79eed92247fc7cb91873a107625372/Energy_efficiency_2022.pdf
20. Mukhamedieva, G. M., Chemirbaeva, M. B., Akbaeva, A. E., Ibraeva, L. M., & Kusmoldaeva, Zh. N. (2023). Sovershenstvovanie toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Kazakhstan: put' k ustoichivomu energeticheskomu budushchemu [Improving the Fuel and Energy Complex of Kazakhstan: The Path to a Sustainable Energy Future]. *Qainar Journal of Social Science*, 2(3), 71–84. <https://doi.org/10.58732/2958-7212-2023-3-71-84>
21. Mushtaikin, A. P., Rychkova, O. V., & Maskaykin, V. N. (2022). Kartografirovaniye izbytochnoi smertnosti v raionakh Mordovii v 2020 godu na fone pandemii koronavirusa [Mapping Excess Mortality in the Districts of Mordovia in 2020 Against the Backdrop of the Coronavirus Pandemic]. *Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii zhurnal* [Scientific Review. International Scientific and Practical Journal], 3. <https://srjournal.ru/2022/id373/>
22. Mushtaikin, A. P., Teslenok, S. A., Semina, I. A., & Ilkaev, S. K. (2022). Geoinformatsionnoe kartografirovaniye izbytochnoi smertnosti v Evrope v 2020–2021 godakh na fone pandemii koronavirusa [Geoinformation Mapping of Excess Mortality in Europe in 2020–2021

- During the Coronavirus Pandemic]. *InterCarto. InterGIS*, 28(2), 332–346. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-2-28-332-346>
23. Ob utverzhdennii skhemy i programmy razvitiia Edinoi energeticheskoi sistemy Rossii na 2022–2028 gody [On the Approval of the Scheme and Program for the Development of the Unified Energy System of Russia for 2022–2028]. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 28.02.2022 No. 146. <https://minenergo.gov.ru/node/22853>
24. Obzor rossiiskogo energorynka v usloviakh pandemii [Overview of the Russian Energy Market in the Pandemic Context]. (2024). Peretok.ru. <https://peretok.ru/infographics/702/22239/>
25. OES Srednei Volgi [Unified Energy System of the Middle Volga]. (2023). System Operator of the Unified Energy System: Official Website. https://www.soups.ru/?id=oes_volga
26. Perera, A. T. D., Javanroodi, K., Mauree, D., Nik, V. M., Florio, P., Hong, T., & Chen, D. (2023). Challenges resulting from urban density and climate change for the EU energy transition. *Nature Energy*, 8, 397–412. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01232-9>
27. Peretochenkova, O. U., & Pyatanov, A. V. (2023). Rynok i energoeffektivnost' teploenergeticheskogo kompleksa [Market and Energy Efficiency of the Heat Energy Sector]. *Izvestiia Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochanye nauki* [Bulletin of Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences], 17(1), 79–87. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2023-17-1-79-87>
28. Realizatsiia energeticheskogo potentsiala regionov Privolzhskogo federal'nogo okruga [Realizing the Energy Potential of the Regions of the Volga Federal District]. (2020). VolgaNews.rf. <https://volga.news/article/541679.html>
29. Robinson, B. L., Halford, A., & Gaura, E. (2022). From theory to practice: A review of co-design methods for humanitarian energy ecosystems. *Energy Research and Social Science*, 89, 102545. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102545>
30. Sagar, A. D., Mathur, A., Birol, F., Mulugetta, Y., Ogunbiyi, D., Sokona, Y., & Steiner, A. (2023). Mission energy access for a just and sustainable future for all. *Nature Energy*, 8(11), 1171–1173. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01380-y>
31. Segales, M., Hewitt, R. J., & Slee, B. (2023). Social innovation and global citizenship: Guiding principles for sustainable, just and democratic energy transition in cities. *Energy Research and Social Science*, 106, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103295>
32. Tarify ZHKKh v Rossii [Housing and Utility Rates in Russia]. (2024). InfoZhKH. <https://info-gkh.ru/tariffs>
33. Tao, Z., Chen, Y., Wang, Z., & Deng, C. (2024). The impact of climate change and environmental regulation on energy poverty: Evidence from China. *Energy, Sustainability and Society*, 14, 54. <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00484-x>
34. Teslenok, S. A., & Teslenok, K. S. (2013). Ob opyte geoinformatsionnogo kartografirovaniia i geoinformatsionnogo modelirovaniia [On the Experience of Geoinformation Mapping and Geoinformation Modeling]. In *XI Zyriyanovskie chteniia: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [XI Zyriyanov Readings: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference] (pp. 195–197). Kurgan: Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta [Kurgan State University Press].
35. Teslenok, S. A., Khlevina, S. E., & Teslenok, K. S. (2015). Regional'nye proiavleniia izmeneniia temperatury vozdukh v geosistemakh lesov i lesosteppei pravoberezh'ia Volgi i iuga Zapadnoi Sibiri [Regional Manifestations of Air Temperature Changes in the Forest and Forest-Steppe Geosystems of the Right Bank of the Volga and Southern Western Siberia]. In *Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniia khoziaistvennoi deiatel'nosti v usloviakh izmeniaiushchegosia klimata: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Problems of Hydrometeorological Support of Economic Activities under Changing Climate Conditions: Proceedings of the International Scientific Conference] (pp. 151–153). Minsk.
36. Teslenok, S. A., Semina, I. A., & Teslenok, K. S. (2016). O neobkhodimosti vyivleniia optimal'nykh metodov i sposobov graficheskoi vizualizatsii rezultatov sotsiologicheskikh

issledovaniy [On the Need to Identify Optimal Methods and Techniques for the Graphic Visualization of Sociological Research Results]. *InterCarto. InterGIS*, 22(1), 309–321. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2016-1-22-309-321>

37. Teslenok, S. A., Kashin, I. Yu., & Teslenok, K. S. (2012). *Izmeneniia vazhneishikh klimaticheskikh kharakteristik Severnogo Kazakhstana v tselinnyi i posttselinnyi periody agrolandshaftogeneza* [Changes in Key Climate Characteristics of Northern Kazakhstan During the Virgin and Post-Virgin Periods of Agro-Landscape Genesis]. In *Regional'nye efekty global'nykh izmenenii klimata: Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Regional Effects of Global Climate Change: Proceedings of the International Scientific Conference] (pp. 550–553). Voronezh: Nauchnaya Kniga [Scientific Book Publishing House].

Тұрақты даму жағдайындағы Мордовия Республикасының жылу энергетикалық жүйесінің қазіргі жағдайы

Андрей Пятанов, Ольга Переточенкова, Евгений Переточенков, Сергей Тесленок

Андатпа: Қалыптасу және даму тарихын, сондай-ақ кез-келген аймақтың жылу-энергетикалық жүйесінің қазіргі жағдайын қарастыру оның одан әрі даму бағыттары мен перспективаларын анықтауда маңызды рөл атқарады. Бұл жаһандық климаттық өзгерістерге байланысты маңызды және өзекті, сонымен қатар жылу-энергетикалық жүйе элементтерінің географиялық таралу ерекшеліктерін және элементтердің таралуындағы қалыптасқан аумақтық сәйкессіздіктерді анықтауға мүмкіндік береді. Бұл Мордовия Республикасының аумағына қатысты осы зерттеудің мақсаты болды.

2024 жылдың басында өңір аумағында жалпы қуаты 434 МВт болатын 13 ЖЭС және 1 кіші ГЭС жұмыс істеді. Энергия жүйесін дамытудың ерекшелігі-бір станцияның, Саран ЖЭО-2-нің абсолютті Үстемдігі. Сондай-ақ, тек бір Саранск қаласында электр энергиясын өндірудің және тұтынудың 70% - дан астамы бар, бұл ірі тұтынушылардың қалада және оның шегінде орналасуымен, сондай-ақ халықтың жоғары (республика тұрғындарының жартысына дейін) шоғырлануымен түсіндіріледі.

Электр энергиясын тұтынуды ұлғайтудың айқын және тұрақты тенденциясы белгіленді. Мордовияның энергетикалық жүйесі табиғи газды негізгі отын ретінде пайдалануға көшумен және газдандыру мен электрлендірудің елдегі ең жоғары (95%) деңгейіне жетумен сипатталады. Көптеген аудандарда тұрғын үй алаңының 1 м²-ге шаққандағы жылу энергиясын және 1 адамға шаққандағы электр энергиясын тұтынудың үлестік мөлшері азайды, бұл халық санының төмендеуімен және климаттық өзгерістер мен энергетиканың тұрақтылығы кезіндегі жаһандық жылыну процестерімен ішінара байланысты.

Түйін сөздер: Жылу энергетикасы; Жылу энергетикалық жүйесі; тарихы; қалыптасуы; жағдайы; тұрақты дамуы; климаты; климаттың жылынуы; Мордовия Республикасы

The current state of the thermal power system of the Republic of Mordovia in the context of sustainable development

Andrey Pyatanov, Olga Peretochenkova, Evgeny Peretochenkov, Sergey Teslenok

Abstract: The consideration of the history of formation and development, as well as the current state of the thermal power system in any region, plays an important role in determining the

directions and prospects for its further development. This is particularly relevant in the context of global climate change, and also allows us to identify the features of the geographical distribution of elements of the heat and power system and the existing territorial imbalances in the distribution of elements. This was the purpose of this study in relation to the territory of the Republic of Mordovia. At the beginning of 2024, 13 thermal power plants and 1 small hydroelectric power plant with a total capacity of 434 MW were operating in the region. A special feature of the development of the energy system is the absolute dominance of one station, Saranskaya CHPP-2. In addition, it has been determined that the city of Saransk accounts for more than 70% of all electricity generation and consumption. This phenomenon can be attributed to the presence of significant consumers within the city's boundaries, as well as the high population density within the city, which is estimated to account for up to half of the Republic's population.

A fairly clear and steady trend towards an increase in electricity consumption has been established. The energy system of Mordovia is characterized by the transition to the use of natural gas as the main fuel and the achievement of one of the highest levels of gasification and electrification in the country (95%). The specific values of thermal energy consumption per 1 m² of living space and electricity per 1 person decreased in most areas, which is associated with a decrease in population and partly, presumably, with global warming processes due to climate change and energy sustainability.

Keywords: thermal power engineering; thermal power system; history; formation; condition; sustainable development; climate; climate warming; Republic of Mordovia

Астана қаласының урбоэкожүйелерінің топырақ жамылғысын ГАЖ-технологияларды қолдану негізінде зерттеу

Талғат Салихов¹, Жарас Берденов¹, Қайрат Сагинов¹, Жансулу Инкарова¹, Людмила Макеева², Ақмаржан Салыкова³, Гаухар Салхожаева¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; tuatai_76@mail.ru, berdenov-z@mail.ru, kairatsaginov@mail.ru, inkarzh@mail.ru; salkhozhayeva@gmail.com

²Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан; Ludmila_mak_72@mail.ru

³Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; akmarzhan.salykova@kaznaru.edu.kz

*Корреспонденция: berdenov-z@mail.ru

Дәйексөз: Салихов, Т., Берденов, Ж., Сагинов, Қ., Инкарова, Ж., Макеева, Л., Салыкова, А., Салхожаева, Г. (2025). Астана қаласының урбоэкожүйелерінің топырақ жамылғысын ГАЖ-технологияларды қолдану негізінде зерттеу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 150(1), 203-216. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-203-216>

Академиялық редактор:
Ж.Г. Берденов

Редакцияға түсті: 24.02.2025
Түзетілді: 05.03.2025
Қабылданды: 10.03.2025
Басылымға шықты: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Андатпа: Экологиялық жүйелердің биологиялық әртүрлілігін, бірегей табиғи кешендерді, табиғи-қорықтық қор нысандарын, сондай-ақ Қазақстан Республикасының мәдени және табиғи мұрасын сақтау – қазіргі кезеңдегі мемлекеттің маңызды міндеттерінің бірі. Қазіргі таңда адамзат алдында тұрған ең өзекті мәселе – қазіргі және болашақ ұрпақтың өмір сүру сапасының қажетті деңгейіне қол жеткізу және оны қолдау мақсатында экономикада экологиялық қауіпсіз (тұрақты) даму жағдайларын жасау. Зерттеудің мақсаты – Астана қаласының урбоэкожүйелерінің топырақ жамылғысын зерттеу арқылы қоршаған орта компоненттерінің қазіргі жағдайын бағалау және елорда дамуының перспективалық мәселелерін шешу. Зерттеудің теориялық және әдістемелік негізін жалпы ғылыми әдістер құрайды: сипаттамалық, салыстырмалы, статистикалық, жүйелік талдау және картографиялық. Зерттеу әдістемесі жалпы принциптер мен тәсілдер жүйесіне негізделген. Жалпы ғылыми: кешенді, интегралдық, жүйелік, экологиялық, географиялық. Жүргізілген ғылыми зерттеулер Қазақстанның қоршаған ортасын қорғау мәселелеріне арналған, олардың шеңберінде Астана қаласының урбоэкожүйелерінің топырақ жамылғысын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыс нәтижесінде ГАЖ негізінде топырақтың тақырыптық карталары мен атрибутивті деректер базасы қалыптастырылды. Зерттеулердің нәтижесінде ArcGIS бағдарламалық өнімі арқылы Астана қаласының урбоэкожүйелерінің сандық картасы әзірленді.

Түйін сөздер: урбоэкожүйе, топырақ жамылғысы, топырақ қескіні, урбаноземдер, ГАЖ-технология, тақырыптық карта

1. Кіріспе

Топырақ құнарлығын сақтау мен жақсарту, жер ресурстарын ұтымды пайдалану, өсімдіктердің өнімділігін арттыру және

қаланың ландшафттары мен топырақ экологиясын жақсарту жалпы мәселелерінің негізгі бөлігі болып табылады (Salikhov, 2017a; Salikhov және т.б., 2024).

Экологиялық жүйелердің биологиялық әртүрлілігін, бірегей табиғи кешендерді, табиғи-қорықтық қор нысандарын, сондай-ақ Қазақстан Республикасының мәдени және табиғи мұрасын сақтау – қазіргі кезеңдегі мемлекеттің маңызды міндеттерінің бірі (Salikhov және т.б., 2022; Salikhov, 2017b).

Қазақстан Республикасының Жер кодексі жер мониторингін жүргізу мен топырақты мемлекеттік жер кадастрына сәйкес ғылыми есепке алуды міндеттейді. Мемлекеттік бақылаудың негізгі міндеттері – жер кадастрын жүргізу мен жерге орналастыру қағидаларын қамтамасыз ету, топырақтың құнарлылығын сақтау және қалпына келтіру, жерді ұтымды пайдалану және қорғау шараларын жүзеге асыру (Земельный кодекс РК, 2005; Салихов және т.б., 2019; Салихов және т.б., 2018a).

Топырақты заманауи бағалау – мемлекет пен қоғамның дамуы үшін өзекті мәселе, өйткені ол топырақтың географиялық таралуы, оның құны, ұтымды пайдаланылуы, қорғалуы және жоспарлы игерілуі жөнінде ақпарат береді. Сонымен қатар, нарықтық қатынастарға негізделген қоғам қалыптасып жатқанда, өндірістік күштердің орналасуы ерекше маңызға ие болады, бұл өз кезегінде топырақ ресурстарын ұтымды пайдалануға ықпал етеді (Salikhov, 2017c; Байков және т.б., 2022; Salikhov және т.б., 2020).

Урбанизация үрдісінің күшеюі көптеген қалаларда экологиялық жағдайдың нашарлауына әкелді: ауа мен топырақтың ластануы, тұрмыстық және өндірістік қалдықтардың көбеюі, рұқсат етілмеген қоқыс үйінділерінің артуы, қала халқының денсаулығының нашарлауы, өсімдіктер мен жануарлар дүниесінің деградациясы сияқты мәселелер өзекті бола бастады (Перцик, 2019; Нарбут, 2018).

Бүгінде мониторинг жүргізуде ГАЖ-дың заманауи компьютерлік модельдеу және визуализация әдістерін қолдану трендке айналды (Shomanova және т.б., 2019; Кушнырь, 2014; Макаров және т.б., 2002). Мұндай әдістер экологиялық аймақтардың кеңістіктік орналасуын анықтау, халық тығыздығын, қаланың шағын аудандары бойынша бөлу, шағын аудандарда әлеуметтік инфрақұрылымды дамыту және басқа да маңызды міндеттерді шешуге мүмкіндік береді.

Қалалық топырақтар антропогендік қызметтің тұрақты және қарқынды әсері нәтижесінде қалыптасады. Көптеген басым қала ландшафттарының (урболандшафттардың) топырақ түзілуіндегі жетекші фактор – техногенез, ол көбінесе табиғи, ең алдымен биоклиматтық топырақ түзуші факторлардың «қабаттасу» әсерін қалдырады. Қалаларда техногенездің әртүрлі құрамдас бөліктері мен табиғи топырақтық-геохимиялық үрдістерінің өзара әрекеттесуі өте күрделі.

Урбанизация тек жергілікті ғана емес, жаһандық экологиялық мәселелердің пайда болуына ықпал етеді. Ол ландшафттың өзгеруіне себепші болып, Жердің биогеохимиялық циклдеріне әсер етеді. Ірі қала табиғи ортаның барлық компоненттерін – атмосфералық ауаны, топырақты, өсімдіктерді, жер үсті және жер асты суларын өзгертеді. Сондай-ақ жер бедеріне, топыраққа, гидрологиялық жүйеге және тіпті климатқа ықпал етеді (Генеральный план, 2023; Verdenov және т.б., 2024).

Урбанизация (қалалардың өсуі) – қоғам қызметінің нәтижесі әрі дамудың факторы болып табылады. Жедел урбанизация қалаларда техникалық, экономикалық және интеллектуалдық әлеуеттің шоғырлануымен, олардың өсуімен және ел өміріндегі маңызының артуымен қатар жүреді.

Алайда, техногендік өркениет адамзатқа тек игіліктер әкеліп қана қоймайды. Егер қоғам мен табиғаттың, адам мен қоршаған ортаның өзара әрекеттесу заңдылықтары жеткілікті түрде ескерілмесе, оның дамуы биосфера мен адамзаттың өзі үшін апатты салдарға әкелуі мүмкін. Сондықтан қазіргі таңда адамзат алдында тұрған ең өзекті мәселе – қазіргі және болашақ ұрпақтың өмір сүру сапасының қажетті деңгейіне қол жеткізу және оны қолдау мақсатында экономикада экологиялық қауіпсіз (тұрақты) даму жағдайларын жасау.

Зерттеу мақсаты – Астана қаласының экологиялық әл-ауқатын қамтамасыз ету үшін оның урбоэкожүйелерінің топырақ жамылғысын зерттеу.

2. Материалдар мен әдістер

Ірі масштабты топырақтық зерттеулер жүргізу үшін тиісті әдістемелік нұсқауларға сүйендік (Salikhov, 2017a; Salikhov, 2017b). Топырақтың физикалық-химиялық параметрлері жалпыға ортақ әдістермен зерттелді (Салихов, 2022; Салихов, 2018a; Salikhov, 2018a; Salikhov, 2019; Салихов, 2017; Салихов және т.б., 2020; Salikhov, 2023; Салихов және т.б., 2019; Салихов және т.б., 2018b; Салихов және т.б., 2020; Салихов, 2018b).

Далалық топырақты зерттеу жұмыстары топырақ телімдерін орналастыруды және сипаттауды қамтиды, қажет болған жағдайда топырақ үлгілері алынады. Кең таралған топырақ түрлерін сипаттау үшін топырақ телімдерін орналастыру орны, контур үлесі табиғат жағдайы тән жерлерден таңдалады. Топырақ телімдерінің тереңдігі топырақ құраушы үрдістердегі тереңдігімен анықталады.

Топырақ телімдерін сипаттау келесі параметрлерді қамтиды:

- бақылау нүктесінің нөмері;
- жер бедерінің және төсеніш жыныстарының сипаттамасы;
- макро-, мезо-, микро жер бедеріне қатысты телімнің орналасуы;
- қайнау тереңдігі, карбонаттың бөлінген заттардың формалары;
- топырақтың беткі жамылғысының сипаттамасы;
- генетикалық көрсеткіштерді сипаттау.

Генетикалық көрсеткіштерді бөлу жыне сипаттау келесідей морфологиялық көрсеткіштер бойынша жүргізіледі.

- топырақ жиектерінің қуаты;
- өңінің түсі, сипаты;
- дымқылдануы;
- құрылымы;
- механикалық құрамы;
- тығыздығы;
- суда еритін тұздардың және гипстің бөлінуі; өсімдіктердің тамыр жүйесінің дамуы;
- бір топырақ жиектен екіншісіне ауысу сипаты.

Топырақтың таксономиялық тұрғыдан анықтау қабылданған жіктелімге сәйкес топырақ телімін сипаттау негізінде жүргізіледі.

Топырақты далалық зерттеу кезінде топырақ жамылғысының антропогендігі бүлінуі де тіркеледі.

Талдау үшін үлгілерді ірітеу, топырақтың таксономиялылығын анықтау және олардың антропогендік ықпалға төзімділігінің бақылау мақсатында топырақтың негізгі химиялық және физико-химиялық қасиеттерін анықтау үшін, аумақтың топырақ жамылғысын сипаттайтын телімдерде жүргізіледі. үлгілерді алу генетикалық топырақ жиектер бойынша жүргізіледі.

Үлгілерді аналитикалық тұрғыдан зерттеу келесідей әдістер бойынша жүргізіледі. қарашірік - ГОСТ 26213-91; алмасу қоспалары - ГОСТ 26487-85; алмасу сыйымдылығы- ГОСТ 17.4.4.01-84; рН – ГОСТ 26423-85; су сығындысы- ГОСТ 26423-85; жиынтық азот- Тюрин бойынша; СО₂ карбонаты - Голубев волюметриялық әдіс бойынша; механикалық құрамы - Качинский бойынша.

Топографиялық-геодезиялық жұмыстар үшін әртүрлі масштабтағы – 1:100 000-нан 1:25 000-ға дейінгі қағаз топырақ карталары пайдаланылды (эталондық учаскелерді іздеу және бөлу мақсатында). ГАЗ технологияларын қолдана отырып, ірі масштабты топырақ картасын жасау, ArcGIS бағдарламалық өнімі негізінде, сканерленген қағаз карталар мен аэрофотожоспарларды пайдалану арқылы жүзеге асырылды.

Зерттеудің теориялық-әдістемелік негізін жалпы ғылыми әдістер құрайды: сипаттамалық, салыстырмалы, статистикалық, жүйелік талдау және картографиялық әдістер.

Зерттеу әдіснамасы жалпы принциптер мен тәсілдер жүйесіне негізделеді: кешенді, интегралды, жүйелік, экологиялық және географиялық әдістер (Salikhov және т.б., 2024; Байков және т.б., 2022; Салихов, 2022; Салихов, 2018a; Salikhov, 2019; Salikhov, 2019; Салихов, 2017; Салихов және т.б., 2020; Salikhov, 2023; Салихов және т.б., 2018d; Салихов және т.б., 2018c; Салихов және т.б., 2020; Салихов, 2018b).

Зерттеу нысаны: Астана қаласының топырақ жамылғысы. Мониторингтік алаңдар белгіленіп, олардың деректері топографиялық негізге түсірілді және GPS координаттары тіркелді. Картографиялау қашықтықтан зондтау деректері мен ГАЗ технологияларын пайдалану арқылы жүргізілді.

3. Нәтижелер

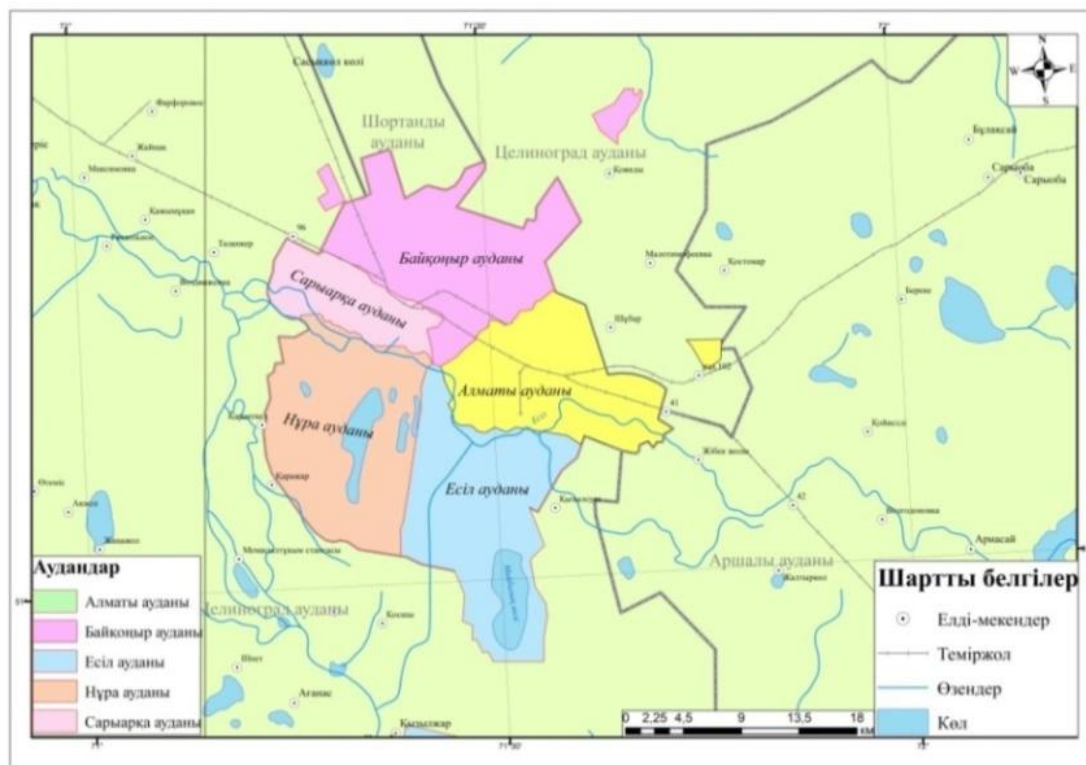
Қаланың қарқынды өсуіне байланысты экологиялық мәселелер үнемі өзекті болып отыр. Қаланың геоэкологиялық тұрақтылығын қамтамасыз ету және қала ортасының сапасын жақсарту бойынша жоспарлы іс-шараларды жүзеге асыру қажет, бұл ретте қаланың ландшафттық ерекшеліктерін тиімді пайдалану маңызды (Генеральный план, 2023; Berdenov және т.б., 2024a; Карпова, 2020). Мұндай шаралар қала тұрғындарының денсаулығын жақсартып, экологиялық жағдайды тұрақтандыруға көмектеседі. Бұл өз кезегінде экологиялық тұрақты, денсаулыққа қолайлы және өзара байланысты қалалық ортаны қалыптастыруға ықпал етеді. Мұнда адам қызметі табиғи экожүйелермен үйлесімділік табады, өмір сүру сапасы артып, табиғи ресурстар сақталады.

Астана қаласы аумағында экожүйелік тәсіл мен жаңа ақпараттық технологияларды пайдалану негізінде ИРН АР19676580 ғылыми жобасы аясында ғылыми зерттеулер жүргізілді.

Тәжірибенің бірінде төмендегідей топырақ қабаттары бар топырақ кесіндісінде морфологиялық белгілер анықталды:

$A_{ш}$ <u>0-7</u> см 7	Қара қоңыр, ылғалдау, ауырсаздақты (ауыркұмбалшықты), сазға (балшыққа), жақын түйіршікті шаңды, жеңіл тығыздалған, өсімдік тамырлары бар, қайнамайтын біртекті, келесі қабатқа өтуі анық,
A_1 <u>7-29</u> см 22	Алдыңғы қабатқа қарағанда қоңырлау, ылғалды, ауырсаздақты, түйіршікті-призмалы, ұсақ қуысты (ұсақ кеуікті), тығыздалған, ұсақ өсімдік тамырлары мол, бөтен қабатқа өтетін шекара анық көрінеді.
B_2 <u>29-48</u> см 19	Қара-қоңыр, ылғал, ауырсаздақты, түйіршікті ұсақ-призмалы, тығыздалған, өсімдік тамырлары бар, 48 см қайнайтын, бөтен қабатқа өту жайлап жүреді.
BC_K <u>48-62</u> см 14	Қара-қоңыр, ылғалданған, біртекті емес аздап қарашірік мөлшері байқалатын, призмалы түйіршікті, тығыз, карбонат дақтары бар ұсақ қуысты, өсімдік тамырлары сирек кездесетін, бөтен қабатқа өту жайлап жүреді.
C_K <u>62-100</u> см 38	Сары-қоңыр, ылғалды, ауырсаздақты, карбонат түйіршік тері көп призмалы, қарашірік мөлшері аздап байқалатын, тығыз, өсімдік тамыршалары сирек кездесетін, бөтен қабатқа өту жайлап жүреді.
C <u>100-122</u> см 20	Сары-қоңыр, ылғалды, сазды тұнба түріндегі, призмалы, қара шірік мөлшері қалдықтары және карбонат аздап кездеседі, тығыз, ұсақ қуысты, бөтен қабатқа өту жайлап жүреді.
D <u>122-150</u> см 28	Сары-қоңыр, сазды, біртекті, карбонат жоқ, жұқа қуысты, құрылымсыз тығыз, гипсті.

Зерттеу аймағы теңіз деңгейінен 350 м биіктікте орналасқан, сирек кездесетін өзен маңындағы төбелері бар толқынды Есіл маңы жазығында жатыр (сурет 1). Жер бедері негізінен Есіл өзенінің жайылмасынан жоғары орналасқан төменгі террасалардан тұрады, мұндағы салыстырмалы биіктіктер 5-7 м-ден аспайды.

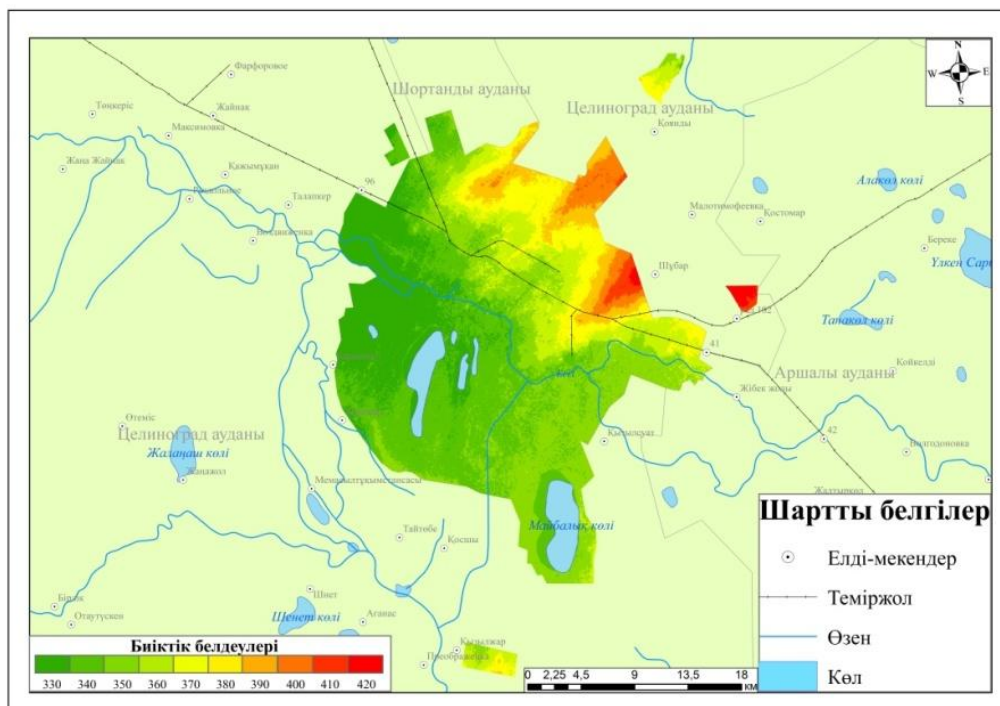


Сурет 1. Астана қаласының урбэоэкожүйелерінің әкімшілік картасы
Ескерту: авторлар құрастырған

Зерттеу аймағының оңтүстік-батыс бөлігі, яғни Есіл өзенінің сол жағалауы, салыстырмалы биіктігі 2-6 м болатын жайылмалық терраса болып табылады. Зерттеу аумағының солтүстік-шығыс бөлігі – абсолюттік биіктігі 500 м-ден аспайтын, қайталама эрозиялық тілімделуге ұшыраған, төбелі-шоқылы қалдық-денудациялық көтеріңкі жазықтар. Жекелеген төбелердің салыстырмалы биіктігі 10-50 м-ден аспайды (сурет 2).

Экожүйе қызметтерін талдау қаланың экологиялық регенерациясының сандық мақсаттарын қамтамасыз ете алады, олар қала аймағына тән экология мен климатпен анықталады (Zari, 2019).

Топырақ-географиялық аудандастыруға сәйкес, зерттеліп отырған аумақ жусанды-боз бетегелі қара қоңыр топырақтар таралған, қоңыржай қуаң дала аймағына жатады (Редков, 1964). Топырақ жамылғысы шұғыл континентті климат жағдайында қалыптасқан, бұл климаттың негізгі ерекшеліктері – жоғары құрғақшылық және температуралық жағдайлардың күрт өзгеруі. Қар жамылғысының жұқа болуы топырақтың терең қатуына ықпал етіп, топырақ түзілу процестеріне өзіндік әсерін тигізеді. Сонымен қатар, бұл аумаққа жоғары деңгейдегі жел белсенділігі тән, бұл өз кезегінде топырақ дефляциясы процестерінің қарқынды жүруінің негізгі себептерінің бірі болып табылады.



Сурет 2. Астана қаласының урбозкожүйелерінің физикалық-географиялық картасы
Ескерту: авторлар құрастырған

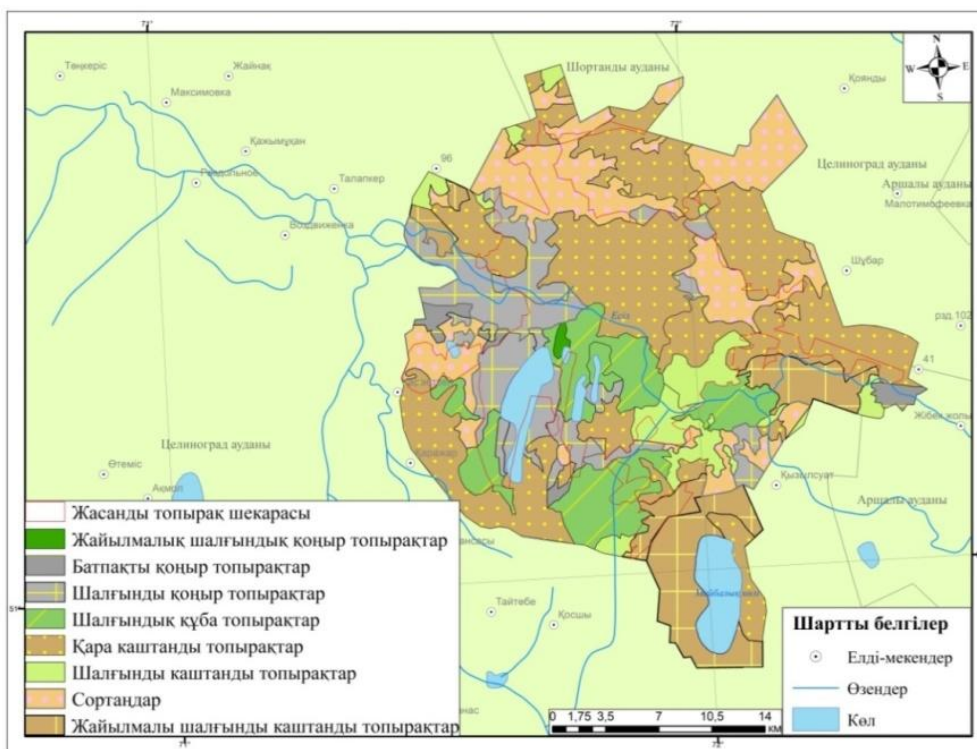
Бұл зерттелген біздің жүйелі сипаттамамызда зерттелетін аумақтың аумағында кездескен топырақ түрлерін көрсетеміз. Егжей-тегжейлі диагностикалық көрсеткіштер Астана қаласының урбозкожүйелері шегінде кең таралған топырақтарын зерттедік. Топырақ тән морфологиялық-генетикалық ерекшеліктері далалық зерттеулер мен камералдық өңдеулеріндегі қолда бар деректер негізінде көрсетітік.

Зерттелетін аумақта топырақ жамылғысының құрылымында қара қоныр топырақтары қалыптасқан. Қара қоныр топырақтары құрғақ дала зонасы жағдайында, су режимі шайналмаған типті, лесс тәрізді саздақтарда қалыптасады. Құрғақ және күрт континенттік климаттың арқасында топырақ түзілуіне ерекше жағдайлар жасалған.

Зерттелетін аумақтың топырақ жамылғысы қара қоныр топырақ аймағында орналасқан. Зерттелетін аумақта мониторинг алаңдары құрылды. Конверт әдісімен зерттелетін жерлерде топырақ сынамаларын алу пункттері орнатылды. Зерттелетін аумақтың топырақ жамылғысы бір тектілігімен және топырақ комбинацияларының (кешендердің, комбинациялардың) кең дамыған күрделі құрылымымен сипатталады. Оның қалыптасуы құрғақ және шөлді далалардың құрғақ және күрт континенттік климаты жағдайында жүреді.

Қала топырағының көптеген функциялары қала тұрғындарын экожүйелік қызметтермен қамтамасыз етуді қамтамасыз етеді, бірақ олар қазіргі қала құрылысын жоспарлауда сирек ескеріледі (Ungaro және т.б., 2022). Урбанизация жер бетіндегі биоәртүрлілік пен экожүйе функцияларына қауіп төндіреді (Gong және т.б., 2024).

Бұл зерттелген жүйелі сипаттамада Астана қаласы аумағында кездесетін топырақтық бірліктер анықталды (сурет 3). Зерттеу аймағында ең кең таралған топырақ түрлеріне егжей-тегжейлі диагностикалық сипаттамалар берілді.



Сурет 3. Астана қаласының урбозкожүйелерінің топырақ картасы
Ескерту: авторлар құрастырған

Астана қаласының топырақтары келесі түрлермен ұсынылған: қара қоңыр топырақтар және олардың түрлері, шалғындық құба және қоңыр топырақтар және олардың түрлері, сортандар және урбаноземдер (жасанды топырақ). Қаланың едәуір аумағында топырақтар қарқынды құрылыс және өнеркәсіптік кәсіпорындардың әсерінен техногендік өзгерістерге ұшыраған. Нәтижесінде заңдылықсыз құрылымы бар техногендік бұзылған топырақ учаскелері – урбаноземдер қалыптасты. Урбаноземдер (UR-D) – елді мекен ортасының қалыптасу процесінде пайда болған топырақтар.

Дегенмен, топырақтың сипаттамалары туралы ақпаратты басқаруға біріктірудің теориялық және практикалық тәсілдерін белсенді дамыту қалалар мен елді мекендерде топырақ ресурстарын басқару жүйесін оңтайландырудың алғышарты болып табылады (Orlova және т.б., 2024).

Қалалық топырақтардың табиғи топырақтардан негізгі айырмашылығы – «урбик» немесе «қалалық» диагностикалық горизонтының болуы. Бұл – беткі қабаттағы қолдан жасалған, араласқан горизонт, мәдени қабаттың бір бөлігі, оның қалыңдығы 50 см-ден асады және құрамында 5%-дан астам антропогендік қосындылар (құрылыс-тұрмыстық қалдықтар, өндірістік қалдықтар) бар. Оның жоғарғы бөлігі жиі техногендік шөгінділердің, атмосфералық шаң түзілімдерінің және эолдық көшу материалдарының ықпалымен қайта гумустанған.

Топырақ картасында (сурет 3) әртүрлі дәрежеде урбанизацияланған және өзгерген топырақтардың таралуы сызбалық түрде көрсетілген. Нәтижесінде әртүрлі морфологиялық топырақ профильдері қалыптасты. Бұл өзгерген нұсқалар бұзылмаған ортаңғы және төменгі профиль бөліктерін және антропогендік бұзылған жоғарғы қабаттарды үйлестіреді. Топырақтар гумустануы, карбонаттылығы, глейленуі, түзілу сипаты (жағалаулы, араласқан), профильдің бұзылу дәрежесі, қосындылардың мөлшері мен құрамы (бетон, шыны, улы қалдықтар және т.б.) және басқа да көрсеткіштері бойынша ерекшеленеді.

4. Талдау

Адамдардың қоныстары экожүйелердің ресурстарына, пайдаларына және қызметтеріне тәуелді, бірақ олар сонымен бірге экожүйенің денсаулығын нашарлатады. Бұл жағдайды шешу үшін қала құрылысы мен жоспарлаудың жаңа тәсілі пайда болады. Регенеративті дизайн, экожүйе деңгейіндегі биомимикрия және экожүйе қызметтері теорияларына сүйене отырып, ол қалалық кеңістікті табиғи экожүйелермен қайта байланыстыратын және бүкіл әлеуметтік-экожүйені қалпына келтіретін, экожүйенің денсаулығы мен экожүйе қызметтерінің өндірісіне ықпал ететін жобаларды жобалауды ұсынады (Blanco және т.б., 2021; Kambo және т.б., 2019).

Топырақ жамылғысының құрылымдарын картаға түсіру және олардың сандық бағалауы үшін қажетті ақпарат жиынтығы қашықтықтан зондтау деректер базасында сипатталған. Мәліметтерді біріктіру кеңістіктік және атрибуттық компонент арқылы жүзеге асырылады: топографиялық және тақырыптық карталардың нәтижелері. Бұл ретте қашықтықтан зондтаудың атрибуттық деректер қорын құру бір картографиялық проекцияға (бұл 1:25000 масштабтағы топографиялық карта болған) байланыстырылған тақырыптық карталарды цифрландыруды көздейді. Жұмыстың нәтижесінде ГАЗ топырақтарының тақырыптық карталары мен атрибуттық базалары қалыптастырылды.

Қалалық аймақтар табиғаттан, қоғамнан және экономикадан тұратын дамыған техногендік кешенді экожүйе болғандықтан, қалалық экожүйенің денсаулығын бағалаудың кілті қалалық экожүйенің белгісіздігін шешу үшін қолайлы үлгіні орнату болып табылады (Yu және т.б., 2009; Semerago және т.б., 2022).

Топырақ көміртегінің экологиялық факторлары және оның жылынуға сезімталдығы аз зерттелген. Авторлар жұпталған қалалық және табиғи экожүйелердің топырақ үлгілерін салыстырады және жылыну кезінде микробиома табиғи экожүйелермен салыстырғанда қалалық жасыл кеңістіктегі топырақ көміртегінің маңызды драйвері екенін көрсетеді. (Delgado-Baquerizo және т.б., 2023). Табиғи экожүйелерде биоәртүрліліктің бірнеше экожүйе функцияларын қолдауға қосқан үлесі жақсы анықталғанымен, жер үсті және жер асты әртүрлілігінің экожүйенің көп функционалдылығымен байланысы қалалық жасыл кеңістіктерде іс жүзінде белгісіз болып қала береді (Fan және т.б., 2023).

Біздің зертеулерімізде, қала топырақтары зерттелетін аумақтың 40-50% алып жатыр және толық немесе жартылай өзгертілген топырақтармен ұсынылған. Толығымен өзгерген топырақтар (қалалық типтік топырақтар) қаланың орталық бөлігіне қарай тартылады және әдетте асфальтпен жабылған қиыршық таспен тығыздалған, сығылған топырақтармен ұсынылған. Жартылай түрлендірілген топырақтар (өтпелі айырмашылықтар), сонымен қатар қалалық топырақтар қатарына жатқызылады, қала шетінде және жаңа құрылыс алаңдарында кең таралған. Өтпелі ерекшеліктер құрылыс кезінде жабылмаған, көбінесе құрылыс қалдықтарымен араласқан, тұрмыстық қалдықтармен және өсімдік қалдықтарымен ластанған сусымалы топырақтармен, бұзылған табиғи топырақтармен сипатталады.

Нашар құрылым мен экологиялық орта сапасы қалалық экожүйенің денсаулығына кедергі келтіретін негізгі факторлар болды. Бір индикатордағы өзгерістердің қалалық экожүйенің денсаулығына әсері бірте-бірте төмендеді, бірақ көрсеткіштердің сезімталдық индексында айқын айырмашылықтар болды. Қалалық экожүйенің денсаулығы экожүйе құрылымы мен тұрақтылығындағы өзгерістерге сезімтал болды (Wang және т.б., 2024).

Зерттеу әлеуметтік-экологиялық негізге негізделген кешенді әлеуметтік-экожүйе моделі әртүрлі қалалық экожүйе қызметтері арасындағы қарым-қатынастар мен өзара әрекеттесулерді ашуға көмектеседі және адам әсерінен туындаған қалалық өсудің экожүйе қызметтеріне қалай әсер ететінін жақсырақ бағалауға және әлеуметтік орта мен қалалық экожүйе қызметтері арасындағы кері байланыс әсерін жақсырақ сипаттауға, сондай-ақ қалалық экожүйе қызметтерінің әртүрлі динамикалық өзгерістерін болжауға мүмкіндік

береді деген болжаммен қорытындыланады. болашақ ұзақ мерзімді сериялардағы сценарийлер (Ouyang және т.б., X.Y. and others, 2022; Saginov және т.б., K. and others, 2024).

Топырақты сақтау және қалпына келтіру шаралары ретінде антропогендік әрекеттің әсеріне ұшырамайтын және табиғи топырақтары мен өсімдіктері бар ландшафты құру үшін пайдалануға болатын аумақтарды («өзектер») анықтау маңызды. Қазіргі уақытта елордада жалпы ауданы 396,4 га 9 саябақ, 30 га төрт бульвар және 131,9 га 90 сквер бар. Талдықөл көлдерінің аумақтарын қаланың табиғи ландшафтына қосу және Есіл өзенінің жайылмасының топырақ жамылғысын жақсарту арқылы халықтың демалысы мен өмір сүруіне қолайлы аумақтар екі-үш есеге ұлғаяды (Генеральный план, 2023; Saginov және т.б., 2024).

5. Қорытынды

Осылайша, зерттеу барысында кеңістіктік талдау саласындағы заманауи әдістер, геоакпараттық модельдеу әдістері қолданылды. Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде әртүрлі рұқсаттағы аэроғарыштық суреттерді кеңінен қолдануға негізделген ГАЖ технологияларымен дәстүрлі жерүсті әдістерін қолдану арқылы топырақ жамылғысын картаға түсіру жүргізілді. Бұл топырақ комбинацияларын олардың белгілі бір генетикалық-геометриялық формаға жататындығына, рельефте пайда болу жағдайларына, сандық көрсеткіштеріне қарай сипаттауға мүмкіндік берді.

Топырақ жамылғысын қалпына келтіру және сақтау шаралары:

- бұзылған топырақ жамылғысы бар учаскелерді шөп егу арқылы рекультивациялау;
- құнарлы топырақ қабатын алу, тасымалдау және сақтау;
- топырақ жамылғысын өндірістік қалдықтардан тазарту;
- жасыл екпелердің аумағын ұлғайту, ескі ағаштарды жаңарту және көпжылдық ағаш-бұта өсімдіктерінің алаңдарын қалпына келтіру;
- топырақ мониторингін жүргізу және топырақ жамылғысын қорғау шараларын әзірлеу;
- табиғи топырағы мен өсімдігі бар ландшафттарды қалыптастыру;
- топырақ жамылғысын ластайтын стационарлық және қозғалмалы көздерден шығатын зиянды заттардың бөлінуін азайту бойынша шараларды әзірлеу және жүзеге асыру;
- топырақтың жай-күйін бақылауды ұйымдастыру және қажет болған жағдайда қала аумағындағы антропогендік бұзылған топырақтарды пайдалануға тыйым салу немесе шектеу;
- топырақ жамылғысының құнарлылығын арттыру үшін ылғалдың жиналуы мен сақталуын қамтамасыз ету шараларын жүргізу, органика-минералды тыңайтқыштар, әсіресе фосфор тыңайтқыштарын қолдану қажет, өйткені топырақта фосфор жеткіліксіз мөлшерде.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация, әдістемелерді әзірлеу, жетекшілік – Т.С.; әдістемені әзірлеу, бағдарламалық қамтамасыз ету және жоба жетекшілігі – Ж.Б.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – Қ.С.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – Ж.И.; мәтінді дайындау және өңдеу – Л.М.; талдау жүргізу – А.С., Г.С.

8. Автор туралы ақпарат

Салихов Талғат Құмарұлы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы Ұлттық аграрлық ғылымдар академиясының корреспондент-мүшесі, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; tuatai_76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8720-0931>

Берденов Жарас Ғылымжанұлы – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің жаратылыстану ғылымдар факультетінің деканы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; berdenov-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2898-8212>

Сагинов Қайрат Мырзабайұлы – PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің физикалық және экономикалық география кафедрасының меңгерушісі, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; kairatsaginov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5349-2358>

Инкарова Жансұлу Ишанқызы – биология ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің доценті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; inkarzh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6679-0207>

Макеева Людмила Анатольевна – биология ғылымдарының кандидаты, Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университетінің доценті, Ауэзов көш., 189А, Көкшетау, Қазақстан, 020004; Ludmila_mak_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5355-2173>

Салықова Ақмаржан Салауатқызы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің профессоры, Абай проспекті, 8г/1, Алматы, Қазақстан, 050010; akmarzhan.salykova@kaznaru.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0651-8313>

Салхожаева Гаухар Мадыхановна – биология ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; salkhozhayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6841-6987>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу ғылыми жоба аясында жүргізіліп, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылады (грант № АР19676580).

10. Алғыстар: жоқ.

11. Мүдделер қақтығыстары: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Baykov, K. S., Salikhov, T. K., Yelyubayev, S. Z., & Salikhova, T. S. (2022). Izucheniye pochvennogo pokrova Chingirlauskogo rayona Zapadno-Kazakhstanskoy oblasti na osnove primeneniya GIS-tekhnologiy [Study of the Soil Cover of the Chingirlau District, West Kazakhstan Region, Based on GIS Technologies]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy* [Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies], 6(27), 73–88. <https://vestnik.sgugit.ru>
2. Berdenov, Z., Kakimzhanov, Y., Arykbayeva, K., Assylbekov, K., Wendt, J. A., Kaimuldinova, K. D., Beketova, A., Ataeva, G., & Kara, T. (2024). Sustainable development of the infrastructure of the city of Astana since the establishment of the capital as a factor of tourism development. *Sustainability (Switzerland)*, 16(24), 2115–2127. <https://doi.org/10.3390/su162410931>
3. Blanco, E., Zari, M. P., Raskin, K., & Clergeau, P. (2021). Urban ecosystem-level biomimicry and regenerative design: Linking ecosystem functioning and urban built environments. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 404. <https://doi.org/10.3390/su13010404>
4. Delgado-Baquerizo, M., García-Palacios, P., Bradford, M. A., Eldridge, D. J., Berdugo, M., Sáez-Sandino, T., Liu, Y. R., Alfaro, F., Abades, S., & Bamigboye, A. R. (2023). Biogenic factors explain soil carbon in paired urban and natural ecosystems worldwide. *Nature Climate Change*, 5(1), 450. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01646-z>
5. Fan, K. K., Chu, H., Eldridge, D. J., Gaitan, J. J., Liu, Y. R., Sokoya, B., Wang, J. T., Hu, H. W., He, J. Z., & Sun, W. (2023). Soil biodiversity supports the delivery of multiple ecosystem

- functions in urban greenspaces. *Nature Ecology & Evolution*, 7(1), 113. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01935-4>
6. General'nyy plan goroda Astana do 2035 goda [General Plan of Astana City until 2035]. (2023). Astana: Upravleniye arkhitektury, gradostroitel'stva i zemel'nykh otnosheniy g. Astana; TOO «Nauchno-issledovatel'skiy proektnyy institut «AstanaGenPlan» [Astana: Department of Architecture, Urban Planning, and Land Relations of Astana; LLP "Scientific Research Design Institute AstanaGenPlan"]. <https://www.gov.kz>
 7. Gong, X., Qiao, Z., Yao, H. F., Zhao, D., Eisenhauer, N., Scheu, S., Liang, C., Liu, M. Q., Zhu, Y. G., & Sun, X. (2024). Urbanization simplifies soil nematode communities and coincides with decreased ecosystem stability. *Soil Biology & Biochemistry*, 190, 109297. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109297>
 8. Kambo, A., Drogemuller, R., & Yarlagadda, P. D. V. (2019). Assessing biophilic design elements for ecosystem service attributes: A subtropical Australian case. *Ecosystem Services*, 39, 100977. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100977>
 9. Karpova, N. V. (2020). Ustoychivoye razvitiye urboekosistemy: sushchnostnoye sodержaniye i osobennosti obespecheniya [Sustainable Development of Urban Ecosystems: Essential Content and Implementation Features]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of Rostov State University of Economics], 4(72), 60–67. <https://vestnik.rsue.ru>
 10. Kushnyr', O. V. (2014). Analiz kontsentratsii naseleniya po dannym s rastrovoy strukturoy [Analysis of Population Concentration Using Raster Data]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], 7, 39–43. <https://geocartography.ru>
 11. Makarov, V. Z., Novakovskiy, B. A., & Chumachenko, A. N. (2002). *Ekologo-geograficheskoye kartografirovaniye gorodov* [Ecological-Geographical Mapping of Cities]. Moscow: Nauchnyy mir. <https://books.totalarch.com>
 12. Narbut, N. A. (2018, March 16). Ustoychivoye razvitiye goroda: rol' otkrytogo prostranstva [Sustainable City Development: The Role of Open Spaces]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Urboekosistemy: problemy i perspektivy razvitiya»* [VI International Scientific-Practical Conference "Urban Ecosystems: Problems and Development Prospects"]. Ishim: Filial Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. <http://elibrary.udsu.ru>
 13. Orlova, K. S., & Savin, I. Y. (2024). Ecosystem services provided by urban soils and their assessment: A review. *Eurasian Soil Science*, 57(6), 1072–1083. <https://doi.org/10.1134/S1064229324600155>
 14. Ouyang, X. Y., & Luo, X. Y. (2022). Models for assessing urban ecosystem services: Status and outlooks. *Sustainability (Switzerland)*, 14(8), 4725. <https://doi.org/10.3390/su14084725>
 15. Pertsik, E. N. (2019). *Geourbanistika: uchebnik* [Geo-Urban Studies: A Textbook]. Moscow: Akademiya. <https://urait.ru/book/geourbanistika-561408>
 16. Redkov, V. V. (1964). *Pochvy Tselinogradskoy oblasti: Avtoref. dis. kand. s.-kh. nauk* [Soils of Tselinograd Region: Abstract of a Candidate of Agricultural Sciences Dissertation]. Alma-Ata. <https://www.geokniga.org/books/25236>
 17. Saginov, K., Berdenov, Z., Inkarova, Z., Mendybayev, E., Ramazanova, N., Assylbekov, K., Safarov, R., & Fomin, I. (2024). Comparative analysis of the infrastructure of the city of Astana with a sociological survey of the mental well-being of citizens in the context of the sustainable development of the urban agglomeration. *Sustainability (Switzerland)*, 16(19), 1781–1803. <https://doi.org/10.3390/su16198623>
 18. Salikhov, T. K. (2017). Fizicheskiye svoystva pochvennogo pokrova geokosistem prigoroda Astany [Physical Properties of Soil Cover in the Suburban Geoecosystems of Astana]. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], 1(331), 156–160. <https://journals.nauka-nanrk.kz>

19. Salikhov, T. K. (2017). The field studies and monitoring soil on the territory of the planned State Nature Reserve "Bokeyorda" West Kazakhstan region. *News of the Academy of Sciences of the Kazakhstan*, 4(424), 258–269. <http://www.geolog-technical.kz/en/archive/>
20. Salikhov, T. K. (2017). The current state of soil fertility geoecosystems the West Kazakhstan. *News of the Academy of Sciences of the Kazakhstan*, 2, 252–256. <http://www.geolog-technical.kz/en/archive/>
21. Salikhov, T. K. (2017). Rare, relict and vulnerable endangered plant species of the "Bokeyorda" Projected State Nature Reservation of West Kazakhstan region. *Reports of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 3(367), 127–136. <https://www.webofscience.com>
22. Salikhov, T. K. (2018). *Топырақтану: оқулық* [Soil Science: A Textbook]. Astana: Ideal-NS. <https://www.geokniga.org/books/25236>
23. Salikhov, T. K. (2018). Tsifrovizatsiya pochvennogo pokrova Karagashskogo sel'skogo okruga Zapadno-Kazakhstanskoy oblasti na osnove primeneniya GIS-tekhnologiy [Digitalization of Soil Cover in the Karagash Rural District, West Kazakhstan Region, Using GIS Technologies]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], 2, 155–163. <https://journal.kazhydromet.kz>
24. Salikhov, T. K. (2018). Workshop on geography of soils with the basics of soil science: A training manual. Astana: L.N. Gumilyov Eurasian National University. <https://www.geokniga.org/books/25236>
25. Salikhov, T. K., Salikhova, T. S., & Bekturganova, L. E. (2018). GIS-kartografirovaniye pochvennogo pokrova Akbulakskogo sel'skogo okruga Zapadno-Kazakhstanskoy oblasti [GIS Mapping of Soil Cover in the Akbulak Rural District, West Kazakhstan Region]. *Voprosy geografii i geoekologii* [Issues of Geography and Geoecology], 2, 61–68. <https://ingeo.kz>
26. Salikhov, T. K., & Salikhova, T. S. (2019). Izucheniye pochvennogo pokrova Aktauskiego sel'skogo okruga Zapadno-Kazakhstanskoy oblasti na osnove primeneniya GIS-tekhnologiy [Study of Soil Cover in the Aktau Rural District, West Kazakhstan Region, Using GIS Technologies]. *Vestnik Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan], 1, 27–33. <https://journals.nnc.kz>
27. Salikhov, T. K. (2019). Workshop on geography of soils with the basics of soil science: A training manual. Astana: L.N. Gumilyov Eurasian National University. <https://www.geokniga.org/books/25236>
28. Salikhov, T. K., & Zholdasova, A. K. (2020). Zhambyl oblysy Zhambyl audanynyn zher resurslaryn zertteu [Study of Land Resources in the Zhambyl District, Zhambyl Region]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], 3, 7–18. <https://journal.kazhydromet.kz>
29. Salikhov, T. K., Baikov, K. S., Salikhova, T. S., Tynykulov, M. K., Nurmukhametov, N. N., & Salykova, A. S. (2020). The study of the current state of the soil cover of the Akshat rural county of West Kazakhstan region on the basis of GIS technologies. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 6(444), 220–227.
30. Salikhov, T. K. (2022). *Praktikum po pochvovedeniyu s osnovami geografii pochv: uchebnoye posobiye* [Practical Guide to Soil Science with Basics of Soil Geography: A Textbook]. Astana: Ideal-NS. <https://www.geokniga.org/books/25236>
31. Salikhov, T. K., Tulegenova, D. K., Berdenov, Z. G., Sarsengaliyev, R. S., & Salikhova, T. S. (2022). Study of the soil cover of ecosystems of the Chingirlaus district of the Western Kazakhstan region on the basis of the application of GIS technologies. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 3(453), 226–242. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.192>

32. Salikhov, T. K. (2023). Complex ecological analysis of the territory of Chingirlau district in West Kazakhstan region: Monograph. Astana: Ideal-NS. <https://www.geokniga.org/books/25236>
33. Salikhov, T. K., Abekeshev, A. I., Abisheva, G. O., Issayeva, Z. B., & Khussainov, M. B. (2024). Study of the ecosystem and unique natural objects of the Chingirlau district of the West Kazakhstan region using GIS technologies. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 5(466), 128–154. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.450>
34. Salikhova, T. K., & Daulet'yarov, A. T. (2018). Izucheniye pochvennogo pokrova Ashchysayskogo sel'skogo okruga Zapadno-Kazakhstanskoy oblasti na osnove primeneniya GIS-tekhnologiy [Study of Soil Cover in the Ashchysay Rural District, West Kazakhstan Region, Using GIS Technologies]. *Vestnik Natsional'noy inzhenernoy akademii Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan], 3(69), 104–111. <https://journal.neark.kz>
35. Semeraro, T., & Buccolieri, R. (2022). Editorial: "Urban ecosystem service assessments." *Frontiers in Environmental Science*, 10, 825002. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.825002>
36. Shomanova, Z. K., Safarov, R. Z., & Nossenko, Y. G. (2019). An actual approach to environmental monitoring of Pavlodar city (Kazakhstan) using neuronets. *The International Journal of Arts & Sciences' (IJAS) international academic conference*. Hungary, Budapest.
37. Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G. M., Baronti, S., & Calzolari, C. (2022). Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127455. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127455>
38. Wang, X. M., & Dong, Q. Q. (2024). Assessment of urban ecosystem health and its influencing factors: A case study of Zibo City, China. *Scientific Report*, 14(1), 8455. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59103-6>
39. Yu, P., Zhou, J. X., & Li, X. M. (2009). A set pair analysis model for urban ecosystem health assessment. *3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Beijing, China, 6381–6384. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2009.5162238>
40. Zari, M. P. (2019). Devising urban biodiversity habitat provision goals: Ecosystem services analysis. *Forests*, 10(5), 391. <https://doi.org/10.3390/f10050391>
41. Zemel'nyy kodeks Respubliki Kazakhstan [Land Code of the Republic of Kazakhstan]. (2005). Almaty: Yurist. <https://adilet.zan.kz>

Research of soil cover of urban ecosystems of the city of astana based on the use of GIS technologies

Talgat Salikhov, Zharas Berdenov, Kairat Saginov, Zhansly Inkarova, Lyudmila Makeyeva, Akmarzhan Salykova, Gaukhar Salkhozhayeva

Abstract: Preservation of biological diversity of ecological systems, unique natural complexes, objects of natural reserve fund, cultural and natural heritage of the Republic of Kazakhstan is one of the important tasks of the state at the present stage. The most pressing issue facing humanity today is the creation of conditions for environmentally safe (sustainable) economic development in order to achieve and maintain the necessary level of quality of life for current and future generations. The purpose of the study is to examine the soil cover of urban ecosystems of Astana with the view to evaluate the current state of environmental components and solve long-term problems of the capital's development. The theoretical and methodological basis of the study is made up of general scientific methods: descriptive, comparative, statistical, system analysis, and cartographic. The

research methodology is based on a system of general principles and approaches. The research methodology is based on a system of general principles and approaches, including complex, integral, systemic, ecological and geographical approaches. The conducted scientific research is devoted to the problems of environmental protection of Kazakhstan on the example of the ongoing project, which presents the results of the study of the soil cover of urban ecosystems of Astana. As a result of the work, thematic maps and attribute databases of GIS: soils were formed. As a result of research based on GIS technology, digital maps of urban ecosystems of Astana were developed using the ArcGIS software product.

Keywords: urban ecosystem, soil cover, peat section, urban lands, GIS technologies, thematic map

Исследования почвенного покрова урбоэкосистем города Астана на основе применения ГИС-технологий

Талгат Салихов, Жарас Берденов, Кайрат Сагинов, Жанслу Инкарова, Людмила Макеева, Акмаржан Салыкова, Гаухар Салхожаева

Аннотация: Сохранение биологического разнообразия экологических систем, уникальных природных комплексов, объектов природно-заповедного фонда, культурного и природного наследия Республики Казахстан – одна из важных задач государства на современном этапе. Наиболее актуальной проблемой, стоящей сегодня перед человечеством, является создание условий для экологически безопасного (устойчивого) развития экономики в целях достижения и поддержания необходимого уровня качества жизни нынешнего и будущих поколений. Цель исследования: изучение почвенного покрова урбоэкосистем города Астана для оценки текущего состояния компонентов окружающей среды и решения перспективных задач развития столицы. Теоретико-методологическую основу исследования составляют общенаучные методы: описательный, сравнительный, статистический, системного анализа, картографический. Методология исследования базируется на системе общих принципов и подходов. Общенаучные: комплексный, интегральный, системный, экологический, географический. Проведенные научные исследования, посвящены проблемам охраны окружающей среды Казахстана на примере проводимого проекта, где приводятся результаты исследования почвенного покрова урбоэкосистем города Астана. В результате работы сформированы тематические карты и атрибутивные базы данных ГИС: почв. В результате исследований на основе ГИС-технологии разработана цифровые карты урбоэкосистем города Астана с помощью программного продукта ArcGIS.

Ключевые слова: урбоэкосистема, почвенный покров, почвенный разрез, урбанозёмы, ГИС-технология, тематическая карта

Редакторы: **Э.Е. Копишев, Н.Е. Рамазанова, Ж.Г. Берденов**

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: <http://bulchmed.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.

Химия. География. Экология сериясы.

– 1 (150)/2025 – Астана: ЕҰУ. 217 б.

Шартты б.т. – 17.75. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 31.03.2025

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulchmed.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00(ішкі 33-207)
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды