

ISSN 2710-1185 (Online)
ISSN 1813-1107 (Print)

ЕҢБЕК ҚЫЗЫЛ ТУ ОРДЕНДІ
«Ә. Б. БЕКТҰРОВ АТЫНДАҒЫ
ХИМИЯ ҒЫЛЫМДАРЫ ИНСТИТУТЫ»
АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ХИМИЯ ЖУРНАЛЫ

ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

CHEMICAL JOURNAL of KAZAKHSTAN

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
«ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКИХ НАУК
им. А.Б. БЕКТУРОВА»

4(92)

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 2025 г.
ИЗДАЕТСЯ С ОКТАБРЯ 2003 ГОДА
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

АЛМАТЫ
2025

Журналдың бас редакторы

Директор

Тасибеков Х.С. - х.ғ.к., ассоц. проф.

Ғылыми редактор:

Қадирбеков Қ.А. - х.ғ.д., проф.

Редакция кеңесінің мүшелері:

Айдемир М., Ph.D., проф., (Туркия); **Бүркітбаев М.М.**, ҚР ҰҒА академигі, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Дембицкий В.М.**, РЖҒА академигі, х.ғ.д., проф. (Канада); **Дергунов С.А.**, Ph.D., проф. (АҚШ); **Джумадилов Т.Қ.**, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Журинов М.Ж.**, ҚР ҰҒА академигі, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Жүсіпбеков Ө.Ж.**, ҚР ҰҒА академигі, т.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Зейналов Э.Б.**, Әзірбайжан ҰҒА корр.-мүшесі, х.ғ.д., проф. (Әзірбайжан); **Ибрагимов А.Б.**, х.ғ.д., проф. (Узбекистан); **Қадырбеков Қ.А.**, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Каюкова Л.А.**, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Малмакова А.Е.**, Ph.D., қауымдастырылған проф. (Қазақстан); **Мун Г.А.**, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Пралиев К.Д.**, ҚР ҰҒА академигі, х.ғ.д. проф. (Қазақстан); **Салахутдинов Н.Ф.**, РҒА корр.-мүшесі, х.ғ.д., проф. (Ресей); **Темель Хамди**, Ph.D., проф. (Түркия); **Фазылов С.Д.**, х.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан); **Ю В.К.**, х.ғ.д., проф. (Қазақстан); **Жанпейісов Н.Ү.**, х.ғ.к., проф., (Жапония); **Узакова Ж.Б.** (Техникалық редактор).

«Қазақстанның химия журналы»

ISSN 2710-1185 (Online); ISSN 1813-1107 (Print)

Құрылтайшы: Еңбек Қызыл Ту орденді Ө.Б. Бектұров атындағы
Химия ғылымдары институты

Тіркеу: Қазақстан Республикасының Мәдениет, ақпарат және қоғамдық
келісім министрлігінде № 3995-Ж 2003 жылғы 25-маусымдағы

2003 жылы құрылған. Жылына 4 рет шығады.

Редакцияның
мекен-жайы: 050010 (A26F3Y1), Қазақстан Республикасы, Алматы қ.,
Ш.Уалиханов көшесі, 106. тел. 8 (727) 291-24-64, 8 (727) 291-59-31;
ics_rk@mail.ru

Басылған
баспахана: ИП «Тойходжаев Н.О.», Алматы қаласы, Алмалы ауданы,
Нұрмақов, көш. 26/195-49; iparuna@yandex.ru

© АҚ «Ө.Б. Бектұров атындағы
Химия ғылымдары институты», 2025

«Қазпошта» АҚ-ның газет-журналдар каталогында немесе оның қосымшаларында
жазылу индексі **75241**.

Главный редактор

Директор

Тасибеков Х.С. - к.х.н., ассоц. проф.

Научный редактор:

Кадирбеков К.А. - д.х.н., проф.

Редакционная коллегия:

Айдемир М., Ph.D., проф., (Турция); **Буркитбаев М.М.**, академик НАН РК, д.х.н., проф. (Казахстан); **Дембицкий В.М.**, академик РАЕН, д.х.н. проф. (Канада); **Дергунов С.А.**, Ph.D., проф. (США); **Джумадилов Т.К.**, д.х.н., проф. (Казахстан); **Джусипбеков У.Ж.**, академик НАН РК, д.т.н., проф. (Казахстан); **Журинов М.Ж.**, академик НАН РК, д.х.н., проф. (Казахстан); **Зейналов Э.Б.**, член-корр. НАНА, д.х.н., проф. (Азербайджан); **Ибрагимов А.Б.**, д.х.н., проф. (Узбекистан); **Кадирбеков К.А.**, д.х.н., проф. (Казахстан); **Каюкова Л.А.**, д.х.н., проф. (Казахстан); **Малмакова А.Е.**, Ph.D., ассоц. проф. (Казахстан); **Мун Г.А.**, д.х.н., проф. (Казахстан); **Пралиев К.Д.**, академик НАН РК, д.х.н., проф. (Казахстан); **Салахутдинов Н.Ф.**, член-корр. РАН, д.х.н., проф. (Россия); **Темель Хамди**, Ph.D., проф. (Турция); **Фазылов С.Д.**, д.х.н., проф., академик НАН РК (Казахстан); **Ю В.К.**, д.х.н., проф. (Казахстан); **Жанпеисов Н.У.**, к.х.н., проф. (Япония); **Узакова Ж.Б.** (Технический редактор).

«Химический журнал Казахстана».

ISSN 2710-1185 (Online); ISSN 1813-1107 (Print)

Учредитель: Ордена Трудового Красного Знамени Институт химических наук им. А.Б. Бектурова.

Регистрация: Министерство культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан № 3995-Ж от 25 июня 2003 г.

Основан в 2003 г. Выходит 4 раза в год.

Адрес редакции 050010 (A26F3Y1), Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Ш. Уалиханова, 106, тел. 8 (727) 291-24-64, 8 (727) 291-59-31; ics_rk@mail.ru

Отпечатано в типографии: ИП «Тойходжаев Н.О.», г.Алматы, Алмалинский район, ул. Нурмакова, 26/195 кв. 49; iparuna@yandex.ru

© АО «Институт химических наук
им. А. Б. Бектурова», 2025

Подписной индекс **75241** в Каталоге газет и журналов АО «Казпочта» или в дополнении к нему.

Editor-in-Chief

Director

Tassibekov Kh.S. - Candidate of Chemical Sciences, assoc. prof.

Scientific editor:

Kadimbekov K.A. - Doctor of Chemical Sciences, prof.

Editorial Board:

Aydemir M., Ph.D., Prof. (Turkey); **Burkitbaev M.M.**, Academician of NAS RK, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Dembitskiy V.M.**, Academician of RANS, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Canada); **Dergunov S.A.**, Ph.D., Prof. (USA); **Dzhussipbekov U.Zh.**, Academician of NAS RK, Doctor of Technical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Fazylov S.D.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof., academician of NAS RK (Kazakhstan); **Hamdi Temel**, Ph.D., Prof. (Turkey); **Ibragimov A.B.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Uzbekistan); **Jumadilov T.K.**, Doctor of Chemical Sciences (Kazakhstan); **Kadimbekov K.A.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Kayukova L.A.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Malmakova A.E.**, Ph.D., Associate Professor (Kazakhstan); **Mun G.A.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Praliyev K.D.**, Academician of NAS RK, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Salakhutdinov N.F.**, Corr. Member of RAS, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Russia); **Yu V.K.**, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Zhurinov M.Zh.**, Academician of NAS RK, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Kazakhstan); **Zeynalov E.B.**, Corr. Member of NAS of Azerbaijan, Doctor of Chemical Sciences, Prof. (Azerbaijan); **Zhanpeisov N.U.**, Candidate of Chemical Sciences, Professor (Japan); **Uzakova Zh.B.** (Technical editor).

«Chemical Journal of Kazakhstan»

ISSN 2710-1185 (Online); ISSN 1813-1107 (Print)

Founder: A.B. Bekturov Institute of chemical sciences awarded by the Order of Red Banner of Labor.

Registration: Ministry of Culture, Information and Public Accord of the Republic of Kazakhstan No. 3995-Ж dated June 25, 2003 year.

«Chemical Journal of Kazakhstan» was founded in 2003 year, publishes four issues in a year.

Address of the Editorial board: 050010 (A26F3Y1), Republic of Kazakhstan, Almaty, Sh. Ualikhanov str., 106, A.B. Bekturov Institute of chemical sciences awarded by the Order of Red Banner of Labor, Fax: 8(727)291-24-64, ics_rk@mail.ru

Printed in the printing house: IP "Toykhodzhaev N.O.", Almaty, Almainsky district, st. Nurmakova, 26/195 sq. 49, iparuna@yandex.ru

PRODUCTION OF PROPPANTS BASED ON FERROALLOY PRODUCTION WASTE AND ASSESSMENT OF THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS

K.A. Kadirbekov^{*1}, M.T. Oshakbayev¹, N.A. Buzayev¹, N.N. Oralbayev¹, G.G. Seitkhal¹,
S. Keneges¹, N.A. Shadin², A.Zh. Aburov^{3,4}, R. Kaiynbayeva¹,
A.A. Yespenbetov¹, M.N. Baimbetov¹

¹JSC "A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences", Almaty, Kazakhstan

²NJSC Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

³LLP "Scientific and Engineering Research Center ERG", Astana, Kazakhstan

⁴JSC "Kazakh-British Technical University" (KBTU), Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: k.kadirbekov@ihn.kz

Abstract. The possibility of producing proppants from ferroalloy production waste (RFKh and VUFKh slags) using liquid glass and a polymer coating (PVA) was investigated. It was found that VUFKh slag, rich in strength-forming phases (90.5%), is the most promising raw material. Proppants obtained from VUFKh slag achieved standard sphericity values, but do not meet the requirements of GOST 54571-2011 for crush resistance (20% excess of the standard) and solubility in HCl. The technological feasibility of producing magnesium silicate proppants, suitable for use in medium-pressure reservoirs, has been substantiated, with the need for further optimization of the mixture composition and firing regime to achieve full compliance with GOST. The use of this waste is recognized as economically viable.

Keywords: Proppants, Ferroalloy Slags, Hydraulic Fracturing, Operational Characteristics, Magnesium Silicates, Technogenic Raw Materials.

Kadirbekov Kairat Adyrbekovich	<i>Doctor of Chemical Sciences</i>
Oshakbayev Mels Tleuberdievich	<i>Doctor of Technical Sciences</i>
Buzaev Nurdaulet Amanzholovich	<i>Doctoral student PhD</i>
Oralbaev Nursultan	<i>Master</i>
Seithal Gulnar	<i>Bachelor</i>
Keneges Sulushash	<i>Bachelor</i>
Shadin Nurgul	<i>PhD</i>

Citation: Kadirbekov K.A., Oshakbayev M.T., Buzayev N.A., Oralbayev N.N., Seitkhal G.G., Keneges S., Shadin N.A., Aburov A.Zh., Kaiynbayeva R., Yespenbetov A.A., Baimbetov M.N. Production of proppants based on ferroalloy production waste and assessment of their operational characteristics. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 5-20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.46>

Abyurov Arman Zhumagulovich	<i>Doctoral student PhD</i>
Kaiynbayeva Raushan	<i>Candidate of Chemical Science</i>
Yespenbetov Asylbek Alibekovich	<i>Doctor of Chemical Sciences</i>
Baimbetov Mizambek	<i>Candidate of Technical Sciences</i>

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОПАНТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОЦЕНКА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

К.А. Кадирбеков^{*1}, М.Т. Ошакбаев, Н.А. Бузаев¹, Н.Н. Оралбаев¹, Г.Г. Сейтхал¹, С.Кенегес¹, Н.А. Шадин², А.Ж. Абюров^{3,4}, Р.Кайынбаева¹, А.А. Еспенбетов¹, М.Н.Баимбетов¹

¹АО «Институт химических наук им. А.Б.Бектурова», Алматы, Казахстан

² НАО Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

³ТОО «Научно-инженерный исследовательский центр ERG», Астана, Казахстан

⁴АО «КБТУ», Алматы, Казахстан

Резюме. Исследована возможность получения пропантов из техногенных отходов ферросплавного производства (шлаки РФХ и ВУФХ) с применением жидкого стекла и полимерного покрытия (ПВС). Установлено, что шлак ВУФХ, богатый прочностными фазами (90.5%), является наиболее перспективным сырьем. Полученные пропанты на основе ВУФХ достигли нормативных показателей сферичности, но не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011 по сопротивлению раздавливанию (20% превышение норматива) и растворимости в HCl. Обоснована технологическая возможность производства магнийсиликатных пропантов, пригодных для применения в пластах со средним давлением, с необходимостью дальнейшей оптимизации состава шихты и режима обжига для достижения полного соответствия ГОСТ. Использование данных отходов признано экономически целесообразным.

Ключевые слова: Пропанты, Ферросплавные шлаки, Гидравлический разрыв пласта, Магнийсиликаты, Эксплуатационные характеристики, Техногенное сырье.

Кадирбеков Кайрат Адырбекович	<i>Доктор химических наук</i>
Ошакбаев Мэлс Тлеубердиевич	<i>Доктор технических наук</i>
Бузаев Нурдаулет Аманжолович	<i>Докторант PhD</i>
Оралбаев Нурсултан	<i>Магистрант</i>
Сейтхал Гулнар	<i>Бакалавр</i>
Кенегес Сулушаш	<i>Бакалавр</i>
Шадин Нургул	<i>PhD</i>
Абюров Арман Жумагулович	<i>Докторант PhD</i>
Кайынбаева Раушан	<i>Кандидат химических наук</i>
Еспенбетов Асылбек Алибекович	<i>Доктор химических наук</i>
Баимбетов Мизамбек	<i>Кандидат технических наук</i>

1. Введение

Топливо-энергетический сектор является ключевым элементом национальной экономики многих стран, включая Республику Казахстан, обладающую значительными запасами углеводородного сырья [1]. В условиях разработки трудноизвлекаемых запасов и естественного истощения месторождений, интенсификация добычи нефти и газа приобретает стратегическое значение. Наиболее востребованной технологией для повышения нефтеотдачи сегодня является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Эффективность ГРП напрямую зависит от использования специальных расклинивающих агентов – пропантов, которые обеспечивают необходимую проницаемость трещин [2].

Мировое потребление пропантов демонстрирует устойчивый рост. Например, в соседней России объем потребления пропантов вырос более чем в 2,7 раза за период с 2011 по 2019 год [3]. Рост добычи нефти в Казахстане также требует увеличения объемов использования пропантов [4]. При этом ключевыми требованиями к пропанту являются высокая механическая прочность, химическая стойкость и низкая себестоимость. Мировой рынок пропантов в 2020 году оценивался в более чем 7 млрд долларов США и прогнозируется дальнейший рост [5]. В настоящее время пропанты производятся преимущественно из дорогостоящего алюмосиликатного и магнезисиликатного сырья [6–11].

В качестве альтернативы традиционному сырью рассматриваются техногенные отходы, в частности, шлаки металлургического производства, что позволяет не только снизить себестоимость конечного продукта, но и решить важные экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов [12, 13]. Шлаки ферросплавного производства, такие как шлаки высокоуглеродистого и рафинированного феррохрома, являются крупнотоннажными отходами. Например, на Аксуском и Актюбинском заводах ферросплавов накоплены миллионы тонн таких шлаков [14]. Химический состав этих шлаков — содержащих оксиды кремния, алюминия, магния и железа — делает их потенциально пригодными для получения керамических пропантов [15].

Основной целью данного исследования является получение пропантов на основе отходов ферросплавного производства с применением связующих веществ и оценка их эксплуатационных характеристик (например, прочности, сферичности, насыпной плотности) для определения возможности их использования в технологии ГРП.

2. Материалы и методы исследования

Получение пропантов осуществлялось по стандартной схеме: подготовка шихты, грануляция и термическая обработка (обжиг). Исходные шлаки РФХ и ВУФХ тонко измельчались в шаровой мельнице до фракции менее 71 мкм (200 меш). Измельченное сырье смешивалось со связующим веществом в концентрации, варьируемой в диапазоне 3–7 масс. % от сухой массы шлака. Формирование сферических гранул проводилось методом окатывания с использованием ручного тарельчатого гранулятора.

Сырые гранулы после сушки подвергались высокотемпературному обжигу в лабораторной печи при 1100–1400°C с изотермической выдержкой в течение 1–2 часов для достижения максимального уплотнения и формирования прочной керамической структуры.

Для оценки соответствия пропантов требованиям нефтегазовой отрасли использовались следующие методики:

Химический состав определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФлуА). Фазовый состав анализировался полуколичественным методом с помощью рентгенодифрактометрического анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3 ($CuK\alpha$ -излучением). Интерпретация данных проводилась с использованием картотеки ICDD (PDF2) для определения количественных соотношений кристаллических фаз.

Прочность на сжатие определялась на универсальной испытательной машине Shimadzu AG 100kNх (Япония) при нагрузках 34–69 МПа (5000–10000 psi), согласно методике, регламентирующей оценку сопротивления пропанта разрушению при высоких нагрузках. Объемная плотность и открытая пористость определялись по ГОСТ 26450.1-85. Сферичность и округлость частиц оценивались с использованием оптического микроскопа и специализированного анализатора формы. Насыпная плотность определялась по стандартной методике.

3. Результаты и Обсуждение

Для оценки пригодности отходов ферросплавного производства в качестве сырья для получения пропантов был проведен химический анализ и РФА шлаков, образующихся при производстве рафинированного (РФХ) и высокоуглеродистого (ВУФХ) феррохрома.

В таблице 1 представлен элементный и оксидный состав исследуемых шлаков. Из полученных данных следует, что шлаки РФХ и ВУФХ отличаются количественным содержанием элементов. В шлаке РФХ содержание Mg и Al меньше в 4.9 и 2.6 раза, а количество Si, Cr и Ca, в 1.4; 4.6 и 8.8 раза больше, соответственно, по сравнению со шлаком ВУХВ.

Таблица 1 – Химический состав шлаков

Содержание элементов, %										
O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Fe	S
Шлак РФХ										
48.51	0.24	5.58	3.25	21.58	0.58	14.38	0.26	3.58	2.04	-
Шлак ВУФХ										
45.37	-	27.19	8.37	5.41	0.11	1.63	0.07	0.77	0.80	0.28
Содержание оксидов, %										
	Na ₂ O	Mg O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	SO ₃
Шлак РФХ										
-	0.34	9.93-9.97	4.32-6.71	26.71-50.78	0.78	22.26-51.21	0.49	5.78-6.71	1.13-2.90	-
Шлак ВУФХ										
-	-	37.90-45.33	15.93-17.63	33.30-35.69	0.13	1.25-2.30	0.12-0.65	1.14-5.49	1.04-1.38	0.71

Количество оксида магния в шлаках РФХ (9,93%) и ВУФХ (37,90%) соответствует требованиям ГОСТ 54571-2011 «Пропанты магнезиально-кварцевые». Содержание же оксида кремния ниже нормы, но его можно увеличить используя кремнесодержащие соединения в качестве добавок.

На рисунках 1 и 2 представлены дифрактограммы шлаков РФХ и ВУФХ, а в таблице 2 приведены вещественно-минералогический состав шлаков.

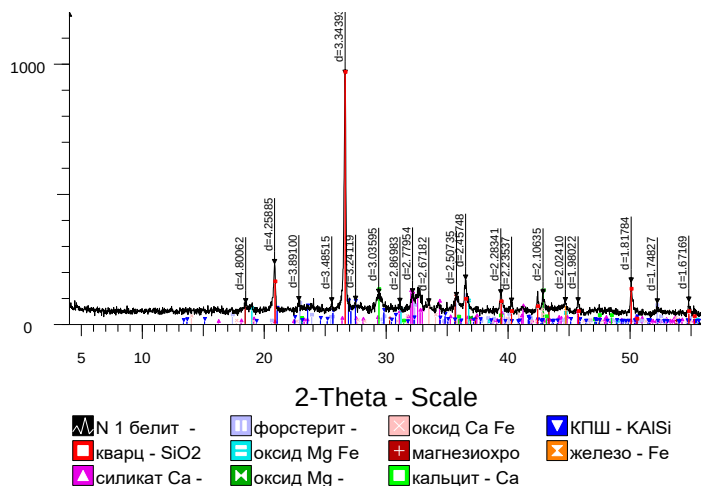


Рисунок 1 – Дифрактограммашлака РФХ.

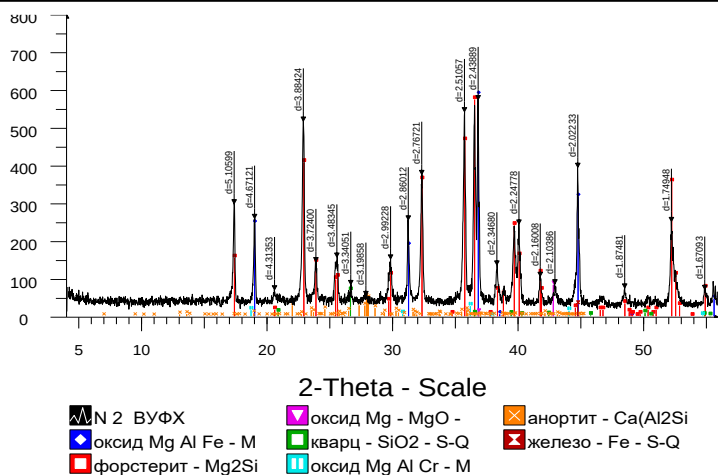


Рисунок 2 – Дифрактограмма шлака ВУФХ.

Таблица 2 – Вещественно-минералогический состав шлаков

Шлак РФХ			Шлак ВУФХ		
Минерал (фаза)	Формула	С, %	Минерал (фаза)	Формула	С, %
кварц	SiO ₂	28.2	кварц	SiO ₂	2.5
силикат Са	Ca ₂ (SiO ₄)	23.8	-	-	-
форстерит	Mg ₂ SiO ₄	19.3	форстерит	Mg ₂ SiO ₄	42.5
оксид Mg Fe Al	MgFe _{0.2} Al _{1.8} O ₄	7.1	оксид MgAlFe	MgAl _{1.9} Fe _{0.1} O ₄	48.0
оксид Mg	MgO	5.8	оксид Mg	MgO	4.1
оксид CaFe	CaFe ₃ O ₅	5.5	-	-	-
-	-	-	оксид MgAlCr	MgAlCrO ₄	1.4
-	-	-	анортит	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	1.1
магнезиохромит	(Mg _{0.984} Cr _{0.016}) (Cr _{1.984} Mg _{0.016}) O ₄	4.4	-	-	-
кальцит	Ca(CO ₃)	3.6	-	-	-
КПШ (шпинель)	KAlSi ₃ O ₈	1.7	-	-	-
железо	Fe	0.7	железо	Fe	0.4

Анализ показал существенные различия в фазовом составе исследуемых техногенных материалов, что определяет потенциальные направления для их синтеза и использования. В составе шлака РФХ доминируют силикатные и кремнеземсодержащие фазы. Основными кристаллическими фазами являются кварц (SiO_2), его содержание составляет 28.0 %, а также силикат кальция (CaSiO_3) в количестве 23.8 %. Магнийсиликатная фаза представлена форстеритом (Mg_2SiO_4), содержание которого составляет 19.3 %.

Шлак ВУФХ отличается значительно более высоким содержанием магний- и алюмосодержащих фаз. Основными компонентами здесь являются оксид магния, алюминия, железа ($\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$) с массовой долей 48.0 % и форстерит (Mg_2SiO_4) в количестве 42.5 %.

Сравнительный анализ таблицы показал, что содержание ключевых фаз, определяющих прочностные характеристики пропантов, существенно выше в шлаке ВУФХ. Так, содержание фазы $\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$ и форстерита (Mg_2SiO_4) в шлаке РФХ соответственно в 6.8 и 2.2 раза меньше, чем в шлаке ВУФХ. Следует отметить, что в шлаке РФХ обнаружены фазы, такие как оксид кальция железа CaFe_3O_5 , кальцит $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, шпинель KAlSi_3O_8 , которые отсутствуют в шлаке ВУФХ. В то же время в шлаке ВУФХ присутствует анортит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$, который не обнаружен в шлаке РФХ.

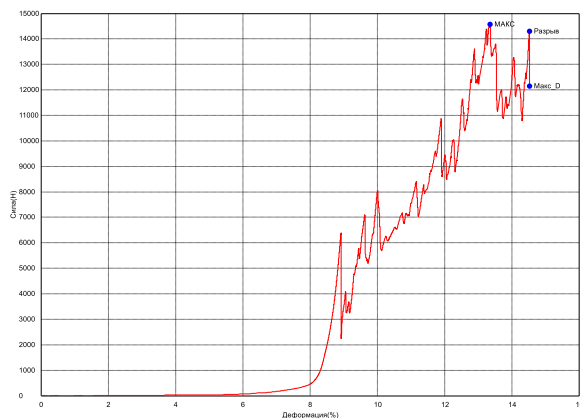
Прочность на сжатие — наиболее критичный параметр для пропантов, поскольку он определяет их способность выдерживать литостатическое давление в пласте. Исходя из этого, шлаки ВУФХ и РФХ были испытаны на прочность.

На рисунках 3 и 4 представлены графики зависимости деформации шлаков РФХ и ВУФХ от силы испытания. Следует отметить, что в рисунках каждый пик это трещина, образующаяся при сжатии на каком-то участке пробы. Шлаки ВУФХ и РФХ не имеют плоскостей и поэтому они разрушались постепенно, соответственно максимальная сила разрушения наблюдалась у того кусочка у которого появились максимально плоские грани.

Анализ графиков зависимости деформации шлаков ВУФХ и РФХ показал, что шлак ВУФХ более прочный, выдерживает более высокую нагрузку при сжатии и разрушается с максимальным значением силы 20939.1 Н (32,46 МПа или 4707 psi) без промежуточных трещин. В отличие от шлака ВУФХ шлак РФХ разрушается постепенно, о чем свидетельствуют промежуточные трещины различные по силе сжатия с максимальным значением силы 14573.1 Н (22,59 МПа или 3277 psi).

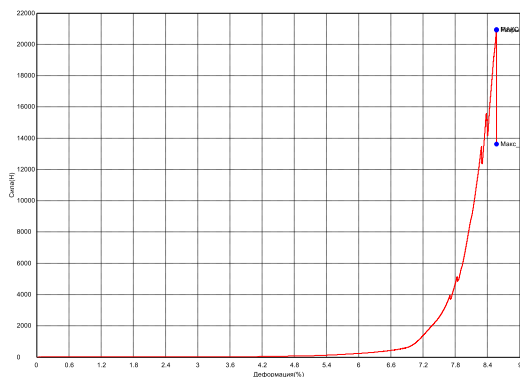
Сравнительный анализ значений такого параметра, как объемная плотность показал их незначительную разницу (таблица 3). Кажущаяся

минералогическая плотность шлака РФХ на $0,3 \text{ г/см}^3$ выше значения для шлака ВУФХ. Существенная разница наблюдается в значениях открытой пористости. Шлак РФХ является более пористым материалом. Значение открытой пористости шлака РФХ на 7.17% выше по сравнению K_p шлака ВУФХ. Исходя из данных таблицы 3 следует, что шлак ВУФХ является более прочным, чем шлак РФХ. Полученные результаты согласуются с испытаниями на сжатие.



Максимальное значение силы испытания: 14573.1 Н
 Промежуточные пики значений силы испытания: 6363.408 Н, 7053.741 Н,
 7991.043 Н, 8407.338 Н, 10872.750 Н, 11618.650 Н, 13600.520 Н.

Рисунок 3 - График зависимости деформации шлака РФХ от силы испытания



Максимальное значение силы испытания: 20939.1 Н

Рисунок 4 - График зависимости деформации шлака ВУФХ от силы испытания.

Таблица 3 - Объемная плотность, кажущаяся минералогическая плотность, открытая пористость шлаков.

Условия испытания шлаков: температура - 25°C; жидкость насыщения - Вода; давление в вакуумной камере -2 кПа; время вакуумирования - 30 минут; время выдержки в жидкости - 30 минут

Наименование образца	Объемная плотность δ_n , г/см ³	Кажущуюся минералогическая плотность δ_n , г/см ³	Открытая пористость K_n , %
Шлак РФХ	3.94	4.51	12.66
Шлак ВУФХ	3.97	4.20	5.49

Выявленные различия в химическом и минералогическом составе шлаков РФХ и ВУФХ, а также их прочностные характеристики, легли в основу разработки двух типов пропантов, что позволило максимально использовать потенциал каждого отхода:

Шлак РФХ, характеризующийся повышенным содержанием кварца (SiO_2) и силиката кальция (CaSiO_3), был использован для получения пропантов с преобладанием алюмосиликатной фазы. В процессе высокотемпературного обжига ($T_{\text{обж}}$) компоненты шихты взаимодействуют, формируя керамическую матрицу, близкую по составу к муллиту или другим высокопрочным алюмосиликатам.

Шлак ВУФХ, обогащенный форстеритом (Mg_2SiO_4) и магнийалюмоферритом ($\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$), использовался для создания магнийсиликатных пропантов. Благодаря высокому суммарному содержанию магнийсодержащих фаз (до 90.5%), эти пропанты обладают потенциалом для достижения особо высоких эксплуатационных характеристик, включая превосходную прочность на сжатие.

Таким образом, использование двух видов отходов ферросплавного производства позволило целенаправленно регулировать фазовый состав конечного продукта, что является ключевым фактором для получения пропантов с заданными свойствами.

Типовая технологическая схема производства пропантов включает подготовку шихты, грануляцию со связующим и окончательный высокотемпературный обжиг, после чего наносится полимерное покрытие.

Гранулирование проводили с использованием товарного раствора жидкого стекла (NaSiO_2) в качестве связующего. Добавление связующего позволяет получить гранулы высокой сферичности и однородности, а также обеспечить достаточную прочность сырых гранул, необходимую для транспортировки и загрузки в печь.

Термообработка образцов осуществлялась при температуре 1100°C. Следует отметить, что выбор температуры определялся содержанием форстерита в шлаке. Согласно [16], при содержании форстерита в образцах более 80% требуется более высокая температура обжига (1300-1400°C), тогда как при содержании менее 55% температурный интервал спекания резко снижается. Охлажденные гранулы покрывались полимером в два слоя. Для покрытия использовали водный раствор поливинилового спирта (ПВС).

Для испытаний были выбраны следующие образцы:

Образец 1: ВУФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:0) + покрытие ПВС.

Образец 2: ВУФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:1) + покрытие ПВС.

Образец 3: РФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:0) + покрытие ПВС.

Далее была проведена оценка эксплуатационных характеристик синтезированных пропантов на соответствие требованиям ГОСТ 54571-2011 (НД), что является ключевым этапом, подтверждающим возможность их промышленного применения в ГРП.

В статье определены основные технические характеристики: гранулометрический состав, насыпная плотность, сферичность и округлость, растворимость в соляной кислоте и сопротивление раздавливанию. Насыпная проницаемость и пропускная способность пропантов в трещине ГРП напрямую зависит от геометрии частиц.

Таблица 4 - Насыпная плотность полученных пропантов

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Образец	Фракция, мм					
			+5	-5+3	-3+2	-2+1 (10/18)	-1+0,5	-0,5
Доля фракций, %	Не менее 90% основной фракции	1	3.4	37.5	29.6	28.1	1.2	0.2
		3	0	9.8	37.9	42.9	9.4	0
		4	0	13.1	29.9	46.3	10.7	0
Насыпная плотность, г/см ³	Не более 1.75	1	1.13	1.03	1.09	1.12	1.2	
		3	0	0.95	1.16	1.25	1.1	0
		4	0	0.81	0.74	0.76	0.88	0

Данные по насыпной плотности выбранных образцов приведены в Таблице 4.

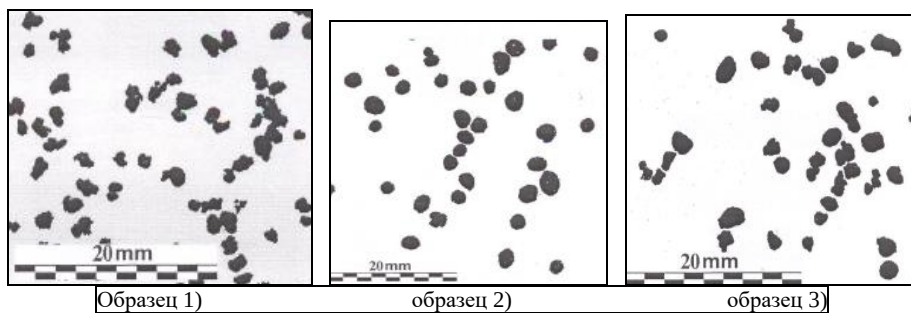
Результаты испытаний показали, что насыпная плотность всех представленных образцов не превышает 1.75 г/см^3 , что полностью соответствует нормативу ГОСТ 54571-2011.

Гранулометрический состав пропантов напрямую зависит от способа грануляции; максимальная доля основной фракции в отобранных образцах пришлась на фракцию 10/18. Данный показатель может быть легко скорректирован путем использования специализированного технологического оборудования или проведением дополнительного рассева по завершении стадии грануляции.

В последние годы нефтедобыча осуществляется в сложных геологических условиях, что требует закачки пропантов сферической или близкой к сферической формы. Такие параметры критически важны, поскольку они обеспечивают экономичную транспортировку пропантов и стабилизируют трещину скважины, повышая нефтеотдачу.

Сферичность образцов пропантов определялась визуальной оценкой с использованием диаграммы Крумбьена-Шлосса. Соответствующие данные представлены в Таблице 5.

Таблица 5 - Сферичность образцов пропантов из ВУФХ и РФХ с использованием диаграммы Крумбьена-Шлосса



Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний			Нормативный документ (НД) на методы испытаний
		Образец 1	Образец 2	Образец 3	
Округлость, условные единицы	Не менее 0.7	0.42	0.79	0.54	ГОСТ 54571-2011, п.8.4
Сферичность, условные единицы	Не менее 0.7	0.53	0.85	0.73	

Показатель сферичности и округлости готовых пропантов не должен быть меньше 0.7. Образец, полученный из шлака ВУФХ, где в качестве связующего использовался водный раствор жидкого стекла в соотношении с водой 1:1 (Образец 2), проходит по норме. Все остальные образцы не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011, п.8.4.

Выбранные образцы пропантов подверглись тесту на растворимость в соляной кислоте. Несмотря на двухслойное полимерное покрытие, растворимость опытных образцов в соляной кислоте превышает норму в 1% (результаты представлены в Таблице 6). Такие показатели не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011, п.8.6.

Таблица 6 - Определение растворимости в соляной кислоте

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний	Нормативный документ (НД) на методы испытаний
Растворимость в соляной кислоте, % образец 1	Не более 1	11.6	ГОСТ 54571-2011, п.8.6
Растворимость в соляной кислоте, % образец 2	Не более 1	10.3	
Растворимость в соляной кислоте, % образец 3	Не более 1	5.9	

Таблица 7 - Сопротивление раздавливанию образцов пропантов

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Массовая доля разрушенных гранул f, %				Нормативны й документ (НД) на методы испытаний
	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний			
		Образец 1	Образец 2	Образец 3	
Сопротивление раздавливанию, при давлении 34.5 МПа	Не более 15	29.3	62.4	72.9	ГОСТ 54571-2011, п.8.11
Сопротивление раздавливанию, при давлении 51.7 МПа (7500 psi)	Не более 20	37	—	74.1	
Сопротивление раздавливанию, при давлении 68.9 МПа (10000 psi)	Не более 20	46.1	—	79.7	

Образцы пропантов, полученные из шлаков ВУФХ и РФХ, были протестированы на механическую прочность путем определения массовой доли гранул, разрушенных заданной сжимающей нагрузкой. Испытания проводились при давлении 34.5 МПа, 51.7 МПа и 68.9 МПа (результаты представлены в Таблице 7).

Все образцы не удовлетворяют требованиям п.8.11 ГОСТ 54571-2011.

Образцы пропантов, полученные из шлака ВУФХ (магнийсиликатные), при оптимальной температуре обжига продемонстрировали высокую механическую прочность по сравнению с образцами из шлака РФХ.

Процент разрушенных гранул магнийсиликатных пропантов на основе шлаков ВУФХ при всех нагрузках превышает допустимую норму примерно только на 20%. Эти результаты свидетельствуют о достаточной прочности для применения в пластах со средним давлением.

4. Заключение

В перспективе, при подборе подходящего связующего и применении эффективной технологии грануляции шихты, эти пропанты могут стать экономически эффективной альтернативой для использования в глубоких скважинах с высокими пластовыми давлениями.

Таким образом, доказана экономическая целесообразность и технологическая возможность получения высокоэффективных пропантов на основе отходов ферросплавного производства, что соответствует стратегическим задачам по утилизации техногенных отходов и снижению импортозависимости.

ФЕРРОКОРЫТПА ӨНДІРІСІНІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ПРОПАНТТАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАЙДАЛАНУ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ

*К.А. Кадирбеков^{*1}, М.Т. Ошакбаев¹, Н.А. Бузаев¹, Н.Н. Оралбаев¹,
Г.Г. Сейтхал¹, С. Кенезес¹, Н.А. Шадин², А.Ж. Абюров^{3,4}, Р. Қайынбаева¹,
А.А. Еспенбетов¹, М.Н. Баимбетов¹*

¹«Ә.Б. Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

²«Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті» КеАҚ, Алматы, Қазақстан

³«ERG ғылыми-инженерлік зерттеу орталығы» ЖШС, Астана, Қазақстан

⁴«Қазақ-Британ Техникалық Университеті» АҚ (КБТУ), Алматы, Қазақстан

Түйіндемe. Феррокорытпа өндірісінің техногендік қалдықтарынан (РФХ және ВУФХ шлактары) сұйық шыны және полимерлі жабын (ПВС) қолдану арқылы пропанттарды алу мүмкіндігі зерттелді. Беріктік фазаларына бай (90.5%) ВУФХ шлағы ең перспективалы шикізат болып табылатыны анықталды. ВУФХ негізінде алынған пропанттар сфералықтың нормативтік көрсеткіштеріне жетті, бірақ ГОСТ 54571-2011 талаптарына жаншылуға төзімділігі (нормативті 20% асыру) және НСІ-де ерігіштігі бойынша сәйкес келмейді. ГОСТ-қа толық сәйкестікке қол жеткізу үшін шихта құрамын және күйдіру режимін одан әрі оптайландыру қажеттілігімен орташа

қысымды қабаттарда қолдануға жарамды магнийсиликатты пропанттарды өндірудің технологиялық мүмкіндігі негізделді. Бұл қалдықтарды пайдалану экономикалық тұрғыдан тиімді деп танылды.

Түйін сөздер: Пропанттар, Ферроқорытпа шлактары, Пластты гидравликалық бұзу, Магний силикаттар, Пайдалану сипаттамалары, Техногендік шикізат.

Кадирбеков Кайрат Адырбекұлы	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
Ошакбаев Мэлс Тлеубердіұлы	<i>Техника ғылымдарының докторы</i>
Бузаев Нұрдаулет Аманжолұлы	<i>PhD докторанты</i>
Оралбаев Нұрсұлтан	<i>Магистрант</i>
Сейтхал Гүлнәр	<i>Бакалавр</i>
Кенегес Сұлушаи	<i>Бакалавр</i>
Шадин Нұрғұл	<i>PhD</i>
Абюров Арман Жумағұлұлы	<i>PhD докторанты</i>
Кайынбаева Раушан	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
Еспенбетов Асылбек Алібекұлы	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
Баимбетов Мизамбек	<i>Техника ғылымдарының кандидаты</i>

Список литературы:

1. Нефтегазовый сектор в структуре национальной экономики РК. Электронное правительство РК. Режим доступа: <http://e.gov.kz> (дата обращения: 19.11.2025).
2. Кутепова М. «За десять лет с российского рынка пропантов импорт был полностью вытеснен». Коммерсантъ. 20.03.2020. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru> (дата обращения: 19.11.2025).
3. Электронный ресурс: russian.alibaba.com (дата обращения 31.01.2022).
4. Рынок пропантов в России в 2018. Анализ и обзор рынка. Режим доступа: <https://www.indexbox.ru>.
5. Axel Reports. Global Proppants for Hydraulic Fracturing Market Analysis and Forecast. Режим доступа: <https://axelreports.com>.
6. Гидравлический разрыв пласта (ГРП). Режим доступа: <http://oilloom.ru> (от 05.03.2018 г.).
7. Пат. 2463329 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Способ изготовления высокопрочного магнийсиликатного пропанта. Плотников В.А., Плинер А.С., Плейчев В.Г., Плинер С.Ю. № 2012117170/03; заявл. 25.04.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
8. Пат. US 0241157 США, МПК E21B43/267. Пропант и способ получения пропанта. Можжерин В.А. [и др.]. № 14/233890; заявл. 08.08.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
9. Пат. 2389710 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Способ получения алюмосиликатного пропанта и состав для его получения. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Решетова А.А. № 2009112521/03; заявл. 06.04.2009; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.
10. Пат. 2737683С1 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Магнийсиликатный пропант и способ его получения. Фарбер И.А. № 2020113872; заявл. 30.04.2020; опубл. 02.12.2020, Бюл. № 34.

11. Пат. 012634B1 Евразийская патентная организация, МПК E21B43/267. Композиция и способ получения проппанта. Смит Р. Дж. [и др.]. № 200801869; заявл. 18.11.2008; опубл. 30.12.2009.
12. Бирюкова А. А., Вакалова Т. В., Джиеналыев Т. Д., Тихонова Т. А. Керамические проппанты из сырья Казахстана для нефтедобывающей промышленности. *Известия НАН РК. Серия химическая*. **2017**. № 4. С. 184–191.
13. Адилов Г. А., Поволоцкий А. Д., Зырянов С. В., Рощин В. Е. Получение расклинивающего материала (проппанта) для нефтедобывающей промышленности из металлургических шлаков. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. **2018**. Т. 18, № 1. С. 58–63. DOI: 10.14529/met180108.
14. Awan F. U. R., Keshavarz A. Adsorption of nanoparticles on glass bead surface for enhancing proppant performance: A systematic experimental study. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**. Vol. 328. Art. 115398. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115398.
15. Ali Aref Ali Alzanam, Umair Ishtiaq, Ali Samer Muhsan, and Norani Muti Mohamed. A Multiwalled Carbon Nanotube-Based Polyurethane Nanocomposite-Coated Sand. Proppant for Improved Mechanical Strength and Flowback Control in Hydraulic Fracturing Applications. *ACS Omega* **2021** 6 (32), 20768-20778. DOI: 10.1021/acsomega.1c01639
16. Патент 2235703 РФ Способ приготовления керамических расклинивателей нефтяных скважин. С.Ю. Плинер, С.Ф. Шмтёв, заявка №2002114787; заяв. 12.05.2003; опубл. 10.10.2004, Бюл. № 15 – 9с.

References

1. Oil and Gas Sector in the Structure of the National Economy of the Republic of Kazakhstan. Electronic Government of the RK. Available at: <http://e.gov.kz> (accessed 19.11.2025).
2. Kutepova M. "Import Was Completely Displaced from the Russian Proppant Market in Ten Years". *Kommersant*. 20.03.2020. Available at: <https://www.kommersant.ru> (accessed 19.11.2025).
3. Electronic resource: russian.alibaba.com (accessed 31.01.2022).
4. Proppant Market in Russia in 2018. Market Analysis and Review. Available at: <https://www.indexbox.ru>.
5. Axel Reports. Global Proppants for Hydraulic Fracturing Market Analysis and Forecast. Available at: <https://axelreports.com>.
6. Hydraulic Fracturing (HF). – Available at: <http://oilloom.ru> (dated 05.03.2018).
7. Pat. 2463329 Russian Federation, IPC C04B35/00. Method for manufacturing high-strength magnesium silicate proppant. Plotnikov V.A., Pliner A.S., Pleychev V.G., Pliner S.Yu. No. 2012117170/03; filed 25.04.2012; publ. 10.07.2014, Bull. No. 19.
8. Pat. US 0241157 USA, IPC E21B43/267. Proppant and method for producing proppant. Mozherin V.A. [et al.]. No. 14/233890; filed 08.08.2012; publ. 10.06.2014, Bull. No. 16.
9. Pat. 2389710 Russian Federation, IPC C04B35/00. Method for producing aluminosilicate proppant and composition for its production. Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Reshetova A.A. No. 2009112521/03; filed 06.04.2009; publ. 20.05.2010, Bull. No. 14.
10. Pat. 2737683C1 Russian Federation, IPC C04B35/00. Magnesium silicate proppant and method for its production. Farber I.A. No. 2020113872; filed 30.04.2020; publ. 02.12.2020, Bull. No. 34.
11. Pat. 012634B1 Eurasian Patent Organization, IPC E21B43/267. Composition and method for producing proppant. Smith R.J. [et al.]. No. 200801869; filed 18.11.2008; publ. 30.12.2009.
12. Biryukova A.A., Vakalova T.V., Dzhienaliev T.D., Tikhonova T.A. Ceramic proppants from Kazakh raw materials for the oil industry. *Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya* (Bulletin of the NAS RK. Chemical Series). **2017**. No. 4. pp. 184–191.
13. Adilov G.A., Povolotskiy A.D., Zyryanov S.V., Roshchin V.E. Production of fracturing material (proppant) for the oil industry from metallurgical slags. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"* (Bulletin of SUSU. Series "Metallurgy"). **2018**. Vol. 18, No. 1. pp. 58–63. DOI: 10.14529/met180108.

14. Awan F.U.R., Keshavarz A. Adsorption of nanoparticles on glass bead surface for enhancing proppant performance: A systematic experimental study. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**. Vol. 328. Art. 115398. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115398.

15. Ali Aref Ali Alzanam, Umair Ishtiaq, Ali Samer Muhsan, and Norani Muti Mohamed. A Multiwalled Carbon Nanotube-Based Polyurethane Nanocomposite-Coated Sand/Proppant for Improved Mechanical Strength and Flowback Control in Hydraulic Fracturing Applications. *ACS Omega* **2021** 6 (32), 20768-20778. DOI: 10.1021/acsomega.1c01639.

16. Pat. 2235703 Russian Federation. Method for preparing ceramic proppants for oil wells. Pliner S.Yu., Shmtyev S.F. Application No. 2002114787; filed 12.05.2003; publ. 10.10.2004, Bull. No. 15. 9 p.

DEVELOPMENT OF RUTHENIUM-FREE ORGANOELEMENTAL DYES FOR HIGH-EFFICIENCY DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS UTILIZING AZERBAIJANI CLAY MINERAL-TiO₂ COMPOSITE PHOTOANODES

Nurlan Najafzade

Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

Corresponding author e-mail: necefzadenurlan@gmail.com

Abstract: *Introduction:* To overcome the drawbacks caused by the high price and limited availability of conventional Ru(II)-based sensitizer, such as N-3 and N719, and to achieve the commercial possibility for dye-sensitized solar cells (DSSCs), the development of new sensitizers is of great significance. In this paper, we explore an energy-efficient and high-performance new architecture. *Goals and objectives:* The overall goal is to develop an innovative DSSC architecture by synergistically combining high-efficiency, ruthenium-free, organoelemental dyes with nanostructured composite photoanodes. The aim is to establish a route to low-cost, high-performance photovoltaics by making use of readily available, abundant clay minerals in Azerbaijan as key photoanode constituent. *Methods:* The approach adopted involves preparation of new composite photoanodes based on titanium dioxide (TiO₂) mixed with locally sourced clay minerals (bentonite and kaolinite). The preparation methods of the clay-TiO₂ composites and their photoanode film fabrication are described. The chapter combines a critical overview of the main active classes of metal-free dyes—porphyrins, phthalocyanines, and indolines—to couple with these novel anodes. *Results and Discussion:* The combination of Azerbaijani clay minerals to the TiO₂ photoanode will bring in significant benefits to the device performance through different synergistic actions. These factors are (1) the higher specific surface area favoring an enhanced dye loading and light harvesting efficiency, (2) the incorporation of light-scattering centers resulting in a prolonged optical path length across the photoanode; and (3) significantly, the prevention of charge recombination at the photoanode/electrolyte interface by surface passivation. Based on physicochemical studies, it is argued that these effects will contribute to a marked enhancement in the crucial photovoltaic (J_{sc}/V_{oc}) parameters, resulting in an overall improvement in the PCE of the device. *Conclusions:* The combination of advanced organic dyes and novel clay-composite photoanodes proposed in this study is a very attractive practical method to develop cost-effective, environmentally friendly photovoltaic technology. The work has demonstrated a promising theoretical and practical approach for experimenting and optimizing a next-generation high-performance sustainable DSSC, with local natural resources to meet a global energy challenge.

Keywords: dye-sensitized solar cells, ruthenium-free dyes, porphyrin, phthalocyanine, titanium dioxide, photoanode, bentonite, kaolinite, clay minerals, charge recombination

Najafzade Nurlan Elnur

Doctorate Student; E-mail.ru: necefzadenurlan@gmail.com

Citation: Najafzade N. Development of ruthenium-free organoelemental dyes for high-efficiency dye-sensitized solar cells utilizing Azerbaijani clay mineral-TiO₂ composite photoanodes. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.47>

1. Introduction

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) are one of the most prominent third-generation photovoltaic technologies, which can be the competitive option compared to current silicon solar cells due to their feasibility of low-cost production, simple fabrication, and employment of abundant materials. DSSCs also have a few special characteristics, such as their mechanical flexibility and excellent performance at low-light intensities, which make them well-suited for building-integrated photovoltaic applications. The working mechanism of a DSSC is quite unique, in which the light absorption and charge transfer activities are separated in two materials to permit optimization of each component independently.[4]. To date, the highest-performance DSSCs have been based on ruthenium(II)-polypyridyl complexes, which have provided power conversion efficiencies (PCEs) of up to 13-14%. But, as is known, ruthenium is one platinum-group metal, which is rare, expensive and toxicity, and is a main limiting factor for the sustainable and large-scale application of DSSC technology. To meet this challenge, a most active area in fundamental and applied studies is to design new metal-free organic sensitizer. These dyes are made from abundant building blocks, have larger molar extinction coefficients, and have a more easily tunable molecular structure. State-of-the-art families such as porphyrins, phthalocyanines or indoline-based dyes have already shown such efficiency, which confirm that they could compete with efficient and now well-established ruthenium complexes. [7]. The photoanode (usually a mesoporous film of titanium dioxide (TiO_2)) is as important as the dye. In this work a new approach of advanced photoanode engineering has been proposed applying local clay minerals originated from Azerbaijan to the standard TiO_2 photoanode. High-quality bentonite and kaolinite clays are found in large quantities in Azerbaijan. This is wanted as the natural low-cost mineral material is believed to be able to facilitate in a synergistic manner the photoanode performance by enlarging the surface area for the higher dye loading, by providing more light scattering centers on the anode to improve photon capturing and by passivating surface trap states on the TiO_2 to hinder charge recombination. This holistic approach is a practical route toward sustainable, high performance and commercially leading photovoltaics. [3,5,6].

2. Experimental

High-performance clay- TiO_2 composite photoanodes can be readily obtained by the well-established wet-chemical approaches. The hydrothermal process refers to the heat-treatment of a slurry containing TiO_2 nanoparticles and disaggregated clay in an autoclave, facilitating to form well-developed and homogeneous composite particles. Alternatively, sol-gel process can offer micro-mixing of TiO_2 soles with a clay dispersion resulting in intimate chemical bonding at the clay- TiO_2 interface. [1,2,7,8]

Irrespective of the process of powder-synthesis, the photoanode film is prepared by making a viscous slurry of composite powder and spreading it on an

FTO-coated glass with a scalable approach such as screen printing. The film is followed by sintering at 450-500 °C to decompose organic additives and form porous network. [13]

A series of characterization methods are necessary in order to confirm the synthesis and investigate the properties of the material. X-Ray Diffraction (XRD) will determine the crystal structure of the composite, ensuring that the anatase TiO_2 is present, and that the clay structure is maintained. SEM measurement would yield more detailed images on the morphology of photoanode, such as particle size, film thickness and porosity. [17] Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) would investigate the presence of the chemical bonds, where definition of the Ti-O-Si bonds would indicate the existence of the strong interfacial bonding. Lastly the specific surface area and pore size distribution would be characterized using Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis to determine the anticipated increase in surface area by the addition of the clay.

3. Results and Discussion

The typical n-type DSSC is a sandwich-type photoelectrochemical cell as shown in Fig. Its functional components consist of a photoanode (omitting the hole-transporting layer), a mono layer of dye on the TiO_2 , an electrolyte penetrated between the TiO_2 particles and a counter electrode; a redox-electrolyte sandwiched between two electrodes serves as charge collector and charge storage, providing the net driving force around 0.7V. [21].

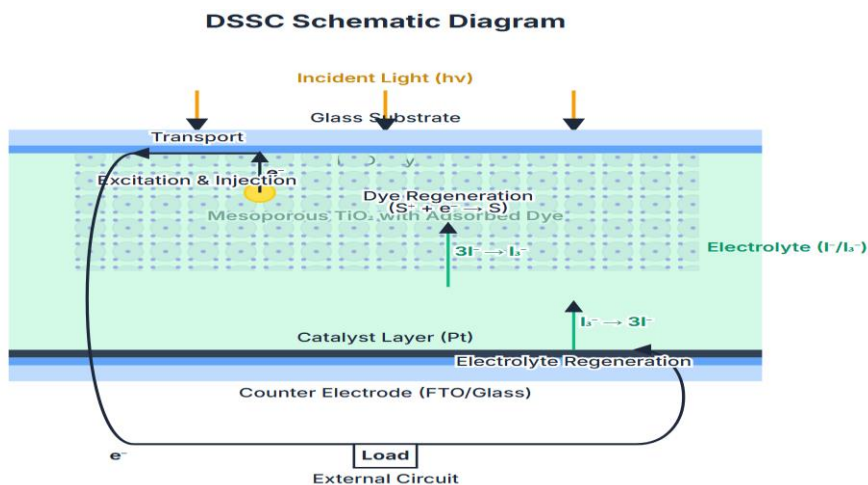


Figure 1 - Schematic of a Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) illustrating its core components and the electron flow pathway. Incident light passes through the transparent FTO-coated glass and excites the dye molecules adsorbed on the mesoporous TiO_2 film. The generated electron is injected into the TiO_2 , travels to the external circuit, and returns via the counter electrode to regenerate the electrolyte, completing the cycle.

The photoconversion action resulting in an electronic charge seesaw is achieved through the cascade of electron transfer processes across these component interfaces, the energetics of which is visually invoked via the line-up of energy levels of the composing materials (Figure 2). [5] The mechanism starts with (1) dye light absorption, followed by (2) ultrafast electron injection from the dye excited state to the TiO_2 conduction band. The electron is subsequently (3) transported in the TiO_2 network to the external circuit. The oxidized dye is step (4) regenerated by the electrolyte (5) regenerated in the counter electrode, closing the circle. A foremost obstacle in DSSC development is the reduction of the non-radiative charge recombination pathways, depicted in Figure 2 as well, where the injected electrons recombine with the oxidized dye or electrolyte species. [15,16].

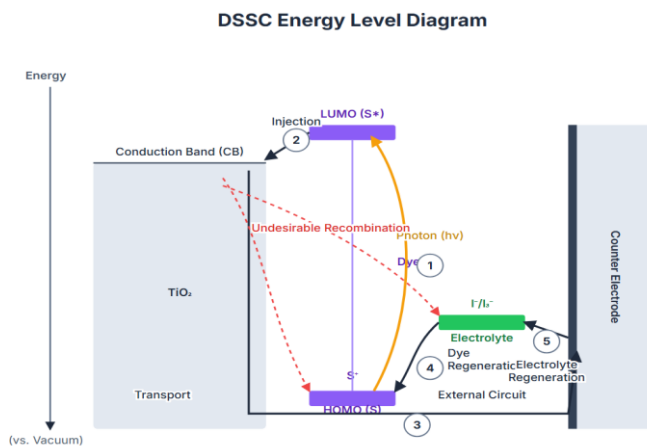


Figure 2 - Energy level diagram of a typical n-type DSSC showing the electron transfer pathway. (1) Photon absorption excites the dye. (2) The electron is injected from the dye's LUMO into the TiO_2 conduction band. (3) The electron is transported to the external circuit. (4) The oxidized dye is regenerated by the I^-/I_3^- electrolyte. (5) The electrolyte is regenerated at the counter electrode. Undesirable recombination pathways are shown with dashed arrows.

The best metal-free organic sensitizers have Donor- π -Acceptor (D- π -A)-type structures. The key design principles are the fine tuning of the HOMO and LUMO energy levels, introduction of strong anchoring moieties (such as $-\text{COOH}$) and bulky substituent addition to prevent the performance-reducing dye aggregation. Besides, inspired from chlorophyll, porphyrins have obtained PCEs of 11-13%. Various materials from phthalocyanines exhibit strong absorptions in the red/NIR region and a great stability, but the aggregation remains an issue, and recent studies have over-passed 4.6%. Indoline dyes are characterized by extraordinarily high molar extinction coefficients, with optimized structures reaching PCEs above 8.0%, directly comparable to the ruthenium based N719 dye under similar conditions. A summary comparison is shown in Table 1. [11,13]

Table 1 - Comparative Performance and Properties of Ruthenium-Free Dye Classes in DSSCs.

Feature	Porphyrin Dyes	Phthalocyanine Dyes	Indoline Dyes
Record PCE (%)	~13%	>4.6%	>8%
Typical Absorption	Strong Soret band (~400-450 nm), weaker Q-bands (~500-700 nm)	Intense Q-band in red/NIR (~650-750 nm)	Broad absorption in visible (~400-600 nm)
Molar Extinction (ϵ)	High (~5times10 ⁴ M ⁻¹ cm ⁻¹)	Very High (~10 ⁵ M ⁻¹ cm ⁻¹)	Extremely High (>6times10 ⁴ M ⁻¹ cm ⁻¹)
Key Advantages	High efficiency, versatile synthesis	Strong NIR absorption, excellent stability	Highest molar extinction coefficients
Key Challenges	Aggregation on TiO ₂ surface	Severe aggregation tendency	Stability under prolonged illumination

Azerbaijan has abundant deposits of nonmetallic minerals, including a high-quality bentonite and kaolinite that are used in the production of cement. The largest bentonite deposits of the country are situated in the Gazakh region (the Dash Salahli deposit), a high-quality sodium bentonite with montmorillonite being the predominant mineral. Its characteristics, namely, high cation exchange capacity (55-166 mg-eq/100g) and large specific surface area, are very favorable to the application on a photoanode. Commercially important reserves of kaolin lie in the Shamkir and Goygol regions as a result of the weathering of volcanic rocks. Kaolinite is non swelling, rigid and it is chemically inert. The characteristics of the clays are compiled in Table 2. [19]

Table 2 - Physicochemical Properties of Selected Azerbaijani Clay Minerals.

Property	Bentonite (Dash Salahli Deposit)	Kaolinite (Shamkir/Geygol Deposits)
Primary Mineral	Montmorillonite (>85%)	Kaolinite
Cation Exchange Capacity	High (55-166 meq/100g)	Low
Swelling Properties	High (swells 15-20x in water)	Non-swelling
Potential Role in Photoanode	Surface passivation, porosity enhancement, high dye loading	Light scattering, structural support, adsorbent

It is expected hence that incorporation of these clays in the TiO₂ photoanode would result to substantial enhancement of DSSC efficiency. Its most relevant consequence is though anticipated to manifest itself in the electron dynamics at the photoanode/dye/electrolyte interface. The clay minerals will provide a passivation layer on the surface of TiO₂, acting as an energetic barrier preventing the recombination of electrons in the TiO₂ conduction band with electron acceptors in the electrolyte. This decrease in "dark current" results in electron lifetime being increased and an instantaneous increase in open circuit voltage (V_{oc}) in the cell. [14] Moreover, the clay platelets also serve as the well light scattering centers, enhancing the optical path length of incident photons inside the photoanode and thereby improving light harvesting efficiency, resulting in the

larger short-circuit current density (J_{sc}). All of these improvements are manifested in an overall projected improvement in the key metrics of photovoltaics as shown in Table 3.

Table 3 - Projected Photovoltaic Parameters for DSSCs with Clay-TiO₂ Photoanodes.

Photoanode Type	Sensitizer Dye	Projected J_{sc} (mA/cm ²)	Projected Voc (V)	Projected FF	Projected PCE (eta, %)
Pure TiO ₂	Indoline (D-series)	10.4	0.74	0.70	~5.4
Bentonite-TiO ₂	Indoline (D-series)	12.5	0.78	0.72	~7.0
Kaolinite-TiO ₂	Indoline (D-series)	13.0	0.75	0.71	~6.9
Pure TiO ₂	Porphyrin (YD-series)	14.0	0.68	0.74	~7.1
Bentonite-TiO ₂	Porphyrin (YD-series)	16.0	0.72	0.75	~8.6

For a PV technology to be competitive in the market it needs to show long-term stability of operation and financial viability. Although organic dyes may be susceptible to degradation, sophisticated molecular design has led to dyes with outstanding stability equivalent to that of Ru-complexes. The liquid electrolyte is the bigger problem – volatile solvents can evaporate or leak. This has encouraged the search of non-volatile ionic liquids or quasi-solid-state polymer gels that have significantly improved long-term stability. This is the primary motivation for this study: reduction of cost. The proposed structure removes costly ruthenium and platinum and adopts readily available organic precursors and local cheap clay minerals. [13] The techno-economic analysis of large-scale DSSC manufacturing forecasts a very competitive Levelized Cost of Energy (LCOE) as low as \$0.0438 per kWh and the use of locally sourced clays will reduce this even further.

4. Conclusion

A concept of the next generation DSSCs targeting to high efficiency, environmental friendliness and low cost has been proposed here by fabricating high-performance, toxic-free organic sensitizers with sustainable composite photoanodes involving TiO₂ and local Azerbaijani clay minerals. This holistic approach targets the two main bottlenecks of cost and scarcity of materials hampering a large-scale penetration of DSSC technology. By substituting now cost-prohibitive and rare metals with abundant organic molecules and the local natural mineral, it opens the way to a genuinely sustainable photovoltaic technology. There is strong theoretical motivation but now the picture needs to be experimentally confirmed. Effort needs to be focused on facile fabrication of the devices to verify the predicted performance improvement, together with systematic optimization of the composite photoanode, exploration of advanced co-sensitization strategies, and investigation of the long-time stability, to explore the full potential of this new ideal architecture. [20]

РАЗРАБОТКА БЕЗРУТЕНИЕВЫХ ОРГАНОЭЛЕМЕНТНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ КРАСИТЕЛЕМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ФОТОАНОДОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ АЗЕРБАЙДЖАНА И TiO_2

Н.Э. Наджафзаде

Азербайджанское национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан

Резюме: *Введение:* Для преодоления недостатков, вызванных высокой ценой и ограниченной доступностью традиционных сенсibilизаторов на основе Ru(II) , таких как N-3 и N719, а также для достижения коммерческой целесообразности солнечных элементов, сенсibilизированных красителем (DSSC), разработка новых сенсibilизаторов имеет огромное значение. В данной работе мы исследуем новую энергоэффективную и высокопроизводительную архитектуру. *Цели и задачи:* Общая цель заключается в разработке инновационной архитектуры DSSC путем синергетического сочетания высокоэффективных, не содержащих рутения, органоэлементных красителей с наноструктурированными композитными фотоанодами. Цель состоит в том, чтобы создать путь к недорогим, высокопроизводительным фотоэлектрическим элементам за счет использования легкодоступных, обильных глинистых минералов Азербайджана в качестве ключевого компонента фотоанода. *Методы:* Принятый подход включает приготовление новых композитных фотоанодов на основе диоксида титана (TiO_2), смешанного с местными глинистыми минералами (бентонит и каолинит). Описаны методы получения композитов глина- TiO_2 и изготовления из них фотоанодных пленок. В главе представлен критический обзор основных активных классов безметаллических красителей — порфиринов, фталоцианинов и индолинов — для сочетания с этими новыми анодами. *Результаты и обсуждение:* Добавление азербайджанских глинистых минералов в фотоанод из TiO_2 принесет значительные преимущества в производительности устройства за счет различных синергетических эффектов. Этими факторами являются: (1) большая удельная поверхность, способствующая увеличению загрузки красителя и эффективности сбора света, (2) включение светорассеивающих центров, что приводит к увеличению оптического пути в фотоаноде; и (3) что особенно важно, предотвращение рекомбинации зарядов на границе раздела фотоанод/электролит за счет пассивации поверхности. На основе физико-химических исследований утверждается, что эти эффекты будут способствовать заметному улучшению ключевых фотоэлектрических параметров (J_{sc}/V_{oc}), что приведет к общему повышению КПД устройства. *Выводы:* Предложенное в данном исследовании сочетание передовых органических красителей и новых глино-композитных фотоанодов является очень привлекательным практическим методом для разработки экономически эффективной и экологически чистой фотоэлектрической технологии. Работа продемонстрировала многообещающий теоретический и практический подход для экспериментирования и оптимизации высокопроизводительных устойчивых DSSC следующего поколения с использованием местных природных ресурсов для решения глобальной энергетической проблемы.

Ключевые слова: солнечные элементы, сенсibilизированные красителем, безрутениевые красители, порфирин, фталоцианин, диоксид титана, фотоанод, бентонит, каолинит, глинистые минералы, рекомбинация зарядов.

Наджафзаде Нурлан Элиур

докторант

ƏZİRBAYJANDIYQ SAZ MINERALDI-TİO₂ KOMPOZİTTİ FOTOANODTARIN PAYDALANA OTYRYP, JOĞARY TIİM/Dİ BOYĞYŞTARMEŇ SEZİMTALDANĖAN KÜN ELEMENŖTERİNE ARNALĖAN RUTENIYSİZ ORĖANOELEMENTTİ BOYĞYŞTARĐY ƏZİRLEU

Н.Э. Наджафзаде

Əzırbayjan Ұлттық аэроғарыш агенттігі, Баку, Əзırbayjan

Түйіндемe: *Kіріспе:* N-3 және N719 сияқты кәдімгі Ru(II) негізіндегі сенсбилизаторлардың жоғары бағасы мен шектеулі қолжетімділігінен туындайтын кемшіліктерді жою және бояғыштармен сезімталданған күн элементтері (DSSC) үшін коммерциялық мүмкіндікке қол жеткізу мақсатында жаңа сенсбилизаторларды әзірлеудің маңызы зор. Бұл мақалада біз энергияны үнемдейтін және жоғары өнімді жаңа архитектураны зерттейміз. *Мақсаттар мен міндеттер:* Жалпы мақсат – жоғары тиімді, рутенийсіз, органоэлементті бояғыштарды нанокұрылымды композитті фотоанодтармен синергетикалық түрде біріктіру арқылы инновациялық DSSC архитектурасын әзірлеу. Мақсат – Өзірбайжандағы оңай қолжетімді, мол саз минералдарын негізгі фотоанод құрамдас бөлігі ретінде пайдалану арқылы арзан, жоғары өнімді фотоэлектрикаға жол ашу. *Әдістер:* Қолданылған тәсіл жергілікті саз минералдарымен (бентонит және каолинит) араластырылған титан диоксиді (TiO_2) негізіндегі жаңа композитті фотоанодтарды дайындауды қамтиды. Саз- TiO_2 композиттерін дайындау әдістері және олардың фотоанодтық үлбірлерін жасау сипатталған. Бұл тарауда осы жаңа анодтармен байланыстыру үшін металсыз бояғыштардың негізгі белсенді кластарына – порфириндерге, фталоцианиндерге және индолиндерге сыни шолу жасалады. *Нәтижелер мен талқылау:* Өзірбайжандық саз минералдарын TiO_2 фотоанодына қосу әртүрлі синергетикалық әрекеттер арқылы құрылғының өнімділігіне айтарлықтай пайда әкеледі. Бұл факторлар: (1) бояғыштың жүктелуін және жарықты жинау тиімділігін арттыратын жоғары меншікті беттік аудан, (2) фотоанод арқылы оптикалық жолдың ұзаруына әкелетін жарық шашырататын орталықтарды енгізу; және (3) маңыздысы, беттік пассивация арқылы фотоанод/электролит интерфейсында зарядтардың рекомбинациясын болдырмау. Физика-химиялық зерттеулерге сүйене отырып, бұл әсерлер маңызды фотоэлектрлік (J_{sc}/V_{oc}) параметрлерінің айтарлықтай жақсаруына ықпал етеді, нәтижесінде құрылғының жалпы ТКӨ (PCE) жақсарады деп пайымдалады. *Қорытындылар:* Бұл зерттеуде ұсынылған озық органикалық бояғыштар мен жаңа саз-композитті фотоанодтардың үйлесімі үнемді, экологиялық таза фотоэлектрлік технологияны дамытудың өте тартымды практикалық әдісі болып табылады. Бұл жұмыс жаһандық энергетикалық мәселені шешу үшін жергілікті табиғи ресурстарды пайдалана отырып, келесі буынның жоғары өнімді тұрақты DSSC-ін эксперименттеу және оңтайландыру үшін перспективалы теориялық және практикалық тәсілді көрсетті.

Түйінді сөздер: бояғышпен сезімталданған күн элементтері, рутенийсіз бояғыштар, порфирин, фталоцианин, титан диоксиді, фотоанод, бентонит, каолинит, сазды минералдар, зарядтардың рекомбинациясы.

*Наджафзаде Нурлан Элнур**докторант*

References

1. O'Regan B., Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. *Nature*, **1991**, 353, 737–740.
2. Mathew S., Yella A., Gao P., et al. Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chemistry*, **2014**, 6, 242–247.
3. Eslamian M., Zabihi F. Dye-sensitized solar cells (DSSCs) and perovskite solar cells (PSCs) for building integrated and wearable photovoltaic applications: A review. *Materials Today Energy*, **2020**, 17, 100439.
4. Yella A., Lee H.-W., Tsao H. N., et al. Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)–based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency. *Science*, **2011**, 334, 629–634.
5. Ramasamy E., Lee W. J., Lee D. Y., Song J. S. An environmentally friendly, ruthenium-free, low-cost dye-sensitized solar cell. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **2010**, 1, 3061–3065.
6. Ellis H., Wilson G. J. The environmental impact of ruthenium. *Platinum Metals Review*, **2010**, 54, 27–33.
7. Kakiage K., Aoyama Y., Yano T., et al. Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. *Chemical Communications*, **2015**, 51, 15894–15897.
8. Hitoshi A., Masaru K., Takayuki K., et al. High efficiency of dye-sensitized solar cells based on metal-free indoline dyes. *Journal of the American Chemical Society*, **2004**, 126, 16702–16703.

9. Alizadeh A.A., Guliyev I.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V. *Geosciences of Azerbaijan, Volume I: Geology*. Springer, **2017**.
10. Aliyev I.J. Kaolines and fire clays. In: *Geology of Azerbaijan, Vol. VI, Economical resources*. Baku, **2003**, 215-220.
11. Lee K.-M., Suryanarayanan V., Ho K.-C. The influence of clay on the performance of dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **2007**, 185, 123-129.
12. Ghadim E. E., Aghdam E. K., et al. Enhanced performance of dye-sensitized solar cells using TiO₂-montmorillonite nanocomposite photoanodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **2016**, 27, 8518-8525.
13. Wu M., Lin Q., Li T., et al. A simple hydrothermal route to synthesize TiO₂/clay nanocomposites. *Applied Clay Science*, **2007**, 37, 218-222.
14. Al-Harhi M. A., Abdel-Aziz M. H., et al. Synthesis and characterization of TiO₂-kaolinite nanocomposites via sol-gel method for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Saudi Chemical Society*, **2015**, 19, 533-540.
15. Nzue M. T., et al. Characterization of Clay-TiO₂ Composite for Photocatalytic Applications. *Journal of Materials and Environmental Science*, **2025**, 16(1), 163-178.
16. Kimura M., Nomoto A., et al. Aggregation-resistant unsymmetrical zinc phthalocyanines for efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, **2010**, 132, 13214-13215.
17. Agayeva Z.R., Jabarov E.E., Yagubov A.I., et al. Radioactivity degree different deposits of bentonites. *Azerbaijan Chemical Journal*, **2025**, 2.
18. Afandiyeva Z.J., et al. Investigation of the basic qualitative properties of the Dashsalahli deposit of bentonite clays. *International Journal of Advanced Research*, **2018**, 6(8), 1-5.
19. Han L., et al. Long-term stability of dye-sensitized solar cells based on an alkyl-functionalized carbazole dye and ionic liquid electrolytes. *Energy & Environmental Science*, **2009**, 2, 1184-1186.
20. Bella F., Gerbaldi C., Barolo C., Grätzel M. The role of the electrolyte in dye-sensitized solar cells: a perspective. *Chemical Society Reviews*, **2015**, 44, 3431-3473.
21. Albero J., et al. Techno-economic analysis of large-scale dye-sensitized solar cell manufacturing. *Energy & Environmental Science*, **2022**, 15, 103-114.

N-BENZYLBI SPIDINE WITH METHOXYPHENETHYL AND IMIDAZOLEPROPYL PHARMACOPHORES: ASSESSMENT OF MYEOSTIMULATING AND GROWTH-STIMULATING ACTIVITY OF NOVEL DERIVATIVES β -CD COMPLEXES

A.B. Kaldybayeva^{1,2,*}, V.K. Yu², A.A. Sergazy², T.M. Seilkhanov³, F. Durap⁴,
M. Aydemir⁴, N.S. Mukhamadiyev⁵

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan

³Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan

⁴Dicle University, Diyarbakir, Turkey

⁵Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine named after Zh. Zhiyembayev, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: altin_28.94@mail.ru

Abstract: *Introduction.* The search for new biologically active compounds remains one of the key goals in medicinal chemistry. *The goal of the present study* to synthesize two groups of compounds: derivatives of methoxyphenethylamine and imidazolepropylamine with a mandatory N-benzylbispidine backbone and evaluate their potential as plant growth regulators and myelostimulators. *Results and Discussion:* New series of 3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-ones were synthesized using traditional methods. The structure of the obtained compounds was confirmed using nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, infrared spectroscopy, and elemental analysis. *Conclusion.* New bicyclic systems have been synthesized in order to identify compounds with high biological potential. The myelostimulating activity of the obtained compounds 5β CD, 6β CD was evaluated in laboratory white female rats and growth-stimulating activity in wheat and soy seeds. The results of the study of myelostimulating activity showed that an imidazole derivative, namely the complex 6β CD, at a dose of 5 mg/kg in a volume of 0.5 ml, exhibits moderate activity against leukocytopoiesis, erythrocytopoiesis and thrombocytopoiesis. The results of the study of growth-stimulating activity showed that the complex (5β CD, HZR-112) stimulates plant growth on soybean seed seedlings. However, the complex (6β CD, HZR-109) does not stimulate the growth of wheat and soybeans, but is an inhibitor. It turned out that the combination of the bispidin fragment with methoxyphenethyl or imidazolepropyl is very promising for the search for new biologically active substrates of various types of action.

Key words: 2-(3-methoxyphenyl)ethanamine, 3-(1H-imidazole-1-yl)propane-1-amine, bicycle, complex, β -cyclodextrin, myelostimulating and growth-stimulating effects.

Kaldybayeva Altynay Bekbolkyzy

PhD; E-mail: altin_28.94@mail.ru

Yu Valentina Konstantinovna

Doctor of Chemical Sciences; E-mail: yu_vk@mail.ru

Sergazy Aida Aidynkyzy

Master of Natural Sciences; E-mail: sergazyaida@gmail.com

Citation: Kaldybayeva A.B., Yu V.K., Sergazy A.A., Seilkhanov T.M., Durap F., Aydemir M., Mukhamadiyev N.S. N-Benzylbispidine with methoxyphenethyl and imidazolepropyl pharmacophores: assessment of myelostimulating and growth-stimulating activity of novel derivatives β -CD complexes. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 30-40. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.48>

Seilkhanov Tulegen Muratovich	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: tseilkhanov@mail.ru</i>
Durap Feyyaz	<i>Doctor of Chemical Sciences; E-mail: feyyazdurap@gmail.com</i>
Aydemir Murat	<i>Doctor of Chemical Sciences; E-mail: aydemir@dicle.edu.tr</i>
Mukhamadiyev Nurzhan Serikzhanovich	<i>Candidate of Biological Sciences; E-mail: nurzhan-80@mail.ru</i>

1. Introduction

One of the ways to create new and more effective drugs is to modify already known pharmacophore structures, which are known to have high biological activity. This method makes it possible to obtain compounds that selectively act on specific molecular targets. As a result, such molecules may have higher therapeutic activity and lower toxicity [1, 2]. One of such promising groups of compounds are 3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-ones and their derivatives, as they are part of natural and synthetic biologically active compounds, possessing antispasmodic, anesthetic, antiarrhythmic and other biological properties [3-6]. And heterocyclic molecules, in turn, represent an important class of structures used in the development of new drugs [7]. Numerous scientific studies have shown that heterocyclic molecules containing the imidazole system have a wide range of biological activity [8, 9].

In the course of the study, for the above reasons, we decided to create two groups of compounds representing 3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-ones. These compounds differ in their chemical structure and properties. The first group contains methoxyphenethyl, and the second group contains imidazole propyl fragments. We hoped to obtain new series of biologically active substances by reacting with these two groups of compounds. Both fragments are known to have antibacterial, antioxidant, antitumor, and antifungal properties [10-13].

2. Experimental part

2.1. The chemical part

The course of the reaction and the uniqueness of the compounds were controlled by TLC. The IR spectra were recorded on a Nicolet 5700 spectrometer in tablets with potassium bromide, which are sealed between potassium bromide plates. The ^1H and ^{13}C spectra of the studied chemicals dissolved in deuterated chloroform were recorded on a JEOL JNM-ECA400 spectrometer with an operating frequency of 400 MHz on hydrogen nuclei. The internal standard is GMDS.

Synthesis of 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-one (1). In a three-necked 250 ml flask equipped with a stirrer, a drip funnel, and a return refrigerator, 70.9 ml of methanol is deoxygenated under nitrogen current. After 30 min, a mixture of 9.79 g (0.065 mol) 2-(3-methoxyphenyl)ethanamine, 7.78 g (0.260 mol) paraform, 3.43 ml concentrated is added (in the ratio of N-benzyl-piperidine-4-one: 2-(3-methoxyphenyl)ethanamine: paraform 1:1:8) hydrochloric acid and 9.74 ml glacial acetic acid and stirred under nitrogen current for 15-20 min. A solution of

12.65 g (0.065 mol) of N-benzyl-piperidine-4-one and 9.74 ml of glacial acetic acid in 70.91 ml of methanol is added to the mixture for 30 min. After 10 h of heating at a temperature of 60-65 °C, another 7.78 g (0.260 mol) of paraform is added and maintained for another 10 h. The reaction is carried out in a nitrogen atmosphere. The solvent is evaporated on a water jet pump, the resulting light burgundy oil is dissolved in 103.4 ml of water and the neutral products are extracted with diethyl ether (it must be remembered that when extracting with diethyl ether, a bottom layer is needed). The aqueous layer is alkalinized to a pH of 10.0–11.0. Next, the target product is extracted with chloroform. The combined chloroform extracts are dried over anhydrous magnesium sulfate. The desiccant is filtered out, the solvent is evaporated on a water jet pump. The resulting oil is isolated by column chromatography and 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo [3.3.1]nonane-9-one (1) is obtained. Yield 22.08 g (94 %), $R_f = 0.675$ (benzene : isopropanol 6:1), $n_D^{20} = 1.561$. Calculated, %: C 75.79; H 7.74; N 7.69. $C_{23}H_{28}N_2O_2$. Found, %: C 75.78; H 7.76; N 7.67. IR spectra, cm^{-1} : 1707 (C=O); 1455 (C=N). 1H NMR (400 MHz, $CDCl_3$), δ , ppm: 2.42-2.46 (4H, dd, $J = 11.9, 2.8$ Hz, $CH_{2ax, 4ax, 6ax 8ax}$), 2.77-2.91 (4H, t, $J = 2.7$ Hz, $NCH_2CH_2CH_{ar}$), 3.06-3.11 (4H, dd, $J = 12.7, 2.8$ Hz, $CH_{2eq, 4eq, 6eq 8eq}$), 3.34-3.63 (2H, s, $CH_2C_6H_5$), 3.71-3.78 (3H, m, CH_3), 6.40-7.11, 7.12-7.36 (9H, m, $J = 8.2, 2.8, 0.5$ Hz, CH_{ar}). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$), δ , ppm: 33.80 (C_{12}), 55.25 (C_{27}), 54.34 ($C_{4,6}$), 58.23 ($C_{1,5}$), 61.25 ($C_{2,8,11}$), 62.09 (C_{19}), 112.00 (C_{16}), 113.53 (C_{14}), 120.33 (C_{18}), 127.03 (C_{23}), 128.48-129.59 ($C_{17,21,22,24,25}$), 137.51 (C_{20}), 138.98 (C_{13}), 159.98 (C_{15}), 214.50 (C_9).

Synthesis of 3-(3-(1H-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-one (2) is carried out in a similar way. Yield 22.72 g (98 %), $R_f = 0.636$ (benzene:isopropanol 6:1), $n_D^{20} = 1.560$. Calculated, %: C 70.98; H 7.74; N 16.55; O 4.73. $C_{20}H_{26}N_4O$. Found, %: C 70.96; H 7.73; N 16.54. IR spectra, cm^{-1} : 1733 (C=O); 1451 (C=N). 1H NMR (400 MHz, $CDCl_3$), δ , ppm: 1.74-1.90 (2H, quint, $J = 2.7$ Hz, $NCH_2CH_2CH_2N$), 2.16-2.28 (2H, t, $J = 2.7$ Hz, $NCH_2CH_2CH_2N$), 2.47-2.57 (2H, tt, $J = 3.1, 2.5$ Hz, CH_2CHCH_2), 2.65-2.81 (4H, dd, $J = 11.8, 2.8$ Hz, $CH_{2ax, 4ax, 6ax 8ax}$), 2.89-3.04 (4H, dd, $J = 12.7, 2.8$ Hz, $CH_{2eq, 4eq, 6eq 8eq}$), 3.46 – 3.55 (2H, s, $CH_2C_6H_5$), 3.89-3.98 (2H, t, $J = 2.7$ Hz, $NCH_2CH_2CH_2N$), 6.79-6.85, 6.93-7.02, 7.35-7.42 (3H, dd, $J = 3.4, 1.9, 1.2$ Hz, CH_{im}), 7.11-7.31 (5H, dd, $J = 7.7, 1.8, 0.5$ Hz, CH_{ar}). ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$), δ , ppm: 28.32 (C_{12}), 44.14 (C_{13}), 46.64 ($C_{1,5}$), 52.48 (C_{11}), 58.17 ($C_{2,8}$), 58.42 ($C_{4,6}$), 61.36 (C_{19}), 119.02 (C_{18}), 127.39 (C_{23}), 128.40 ($C_{22,24}$), 128.96 ($C_{21,25}$), 129.35 (C_{17}), 137.43 (C_{15}), 137.96 (C_{20}), 214.32 (C_9).

Synthesis of 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane (3). To a mixture of 3 g (0.008 mol) 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-9-one (1) and 1.31 g (0.041 mol) of hydrazine hydrate (99 % solution) in 23.92 ml of triethylene glycol at 60 °C add 5.69 g (0.102 mol) KOH. The reaction mixture is heated to 160-170 °C and stirred at this temperature for 5 h. At a temperature of 190-200 °C, water and excess hydrazine are distilled off. After cooling the reaction mixture to room temperature, 40.42 ml of distilled

water is added, extracted with diethyl ether, and dried over anhydrous MgSO_4 . The solvent is evaporated, and the resulting product is purified using column chromatography and of 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane (3) is obtained. Yield 1.25 g (44 %), $R_f=0.173$ (benzene :isopropanol 7:1). $n_D^{20} = 1.446$. Calculated, %: C 78.82; H 8.63; N 7.99. $\text{C}_{23}\text{H}_{30}\text{N}_2\text{O}$. Found, %: C 78.80; H 8.65; N 7.98. IR spectra, cm^{-1} : 1071 (C-N). ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ , ppm: 1.56 (2H, dt, $J = 13.0, 2.7$ Hz, CHCH_2CH), 2.11 (2H, ttt, $J = 3.2, 2.7, 2.5$ Hz, CHCH_2CH), 2.67 (2H, t, $J = 2.7$ Hz, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_{\text{ar}}$), 2.87-3.03 (10H, 2.94 (dd, $J = 10.6, 2.8$ Hz, $\text{CH}_{2\text{ax},4\text{ax},6\text{ax},8\text{ax}}$), 2.96 (dd, $J = 10.3, 2.8$ Hz, $\text{CH}_{2\text{eq},4\text{eq},6\text{eq},8\text{eq}}$), 2.98 (t, $J = 2.7$ Hz, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_{\text{ar}}$), 3.66 (2H, s, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 3.73 (3H, m, CH_3), 6.74-6.91, 7.20-7.45 (9H, m, $J = 8.2, 7.7, 2.8, 1.8, 0.5$ Hz, CH_{ar}). ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3), δ , ppm: 28.90 ($\text{C}_{1,5}$), 33.90 (C_{11}), 36.11 (C_9), 55.52 (C_{26}), 59.70-59.81 ($\text{C}_{2,4,6,8}$), 61.31 (C_{10}), 62.83 (C_{18}), 112.52 (C_{15}), 114.32 (C_{13}), 121.32 (C_{17}), 127.21 (C_{22}), 128.30 ($\text{C}_{20,24}$), 129.01 ($\text{C}_{21,23}$), 129.40 (C_{16}), 134.51 (C_{12}), 137.32 (C_{19}), 159.64 (C_{14}).

Synthesis of 3-(3-(1H-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane (4) is carried out in a similar way. Yield 3.20 g (56 %), $R_f=0.21$ (benzene :isopropanol 7:1). $n_D^{20} = 1.483$. Calculated, %: C 74.03; H 8.70; N 17.27; $\text{C}_{20}\text{H}_{28}\text{N}_4$. Found, %: C 74.01; H 8.73; N 17.26. IR spectra, cm^{-1} : 1070 (C-N), 1510 (C=N). ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ , ppm: 1.52 (2H, dt, $J = 13.0, 2.7$ Hz, CHCH_2CH), 1.56 (2H, quint, $J = 2.7$ Hz, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$), 2.04 (2H, ttt, $J = 3.2, 2.7, 2.5$ Hz, CH_2CHCH_2), 2.15-2.37 (4H, dd, $J = 10.6, 2.8$ Hz, $\text{CH}_{2\text{ax},4\text{ax},6\text{ax},8\text{ax}}$), 2.61-2.83 (4H, dd, $J = 10.2, 2.8$ Hz, $\text{CH}_{2\text{eq},4\text{eq},6\text{eq},8\text{eq}}$), 3.05-3.14 (2H, t, $J = 2.7$ Hz, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$), 3.35 (2H, s, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 3.85 (2H, t, $J = 2.7$ Hz, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$), 6.96 (1H, dd, $J = 3.4, 1.9$ Hz), 7.03 (1H, dd, $J = 3.4, 1.1$ Hz), 7.49 (1H, dd, $J = 1.9, 1.1$ Hz), 7.12-7.25 (5H, dd, $J = 7.8, 1.84, 0.94$ Hz, CH_{ar}). ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3), δ , ppm: 29.15 ($\text{C}_{1,5}$), 29.44 (C_{11}), 34.46 (C_9), 47.73 (C_{12}), 50.08 (C_{10}), 56.35 ($\text{C}_{4,6}$), 59.25 ($\text{C}_{2,8}$), 62.05 (C_{18}), 120.45 (C_{17}), 127.03 (C_{22}), 128.48 ($\text{C}_{21,23}$), 129.74 ($\text{C}_{20,24}$), 133.92 (C_{16}), 136.33 (C_{14}), 138.10 (C_{19}).

The complex of 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with β -cyclodextrin ($5\beta\text{CD}$). Hot solutions of 1.19 g (0.0034 mol) 3-(3-methoxyphenethyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane (3) are mixed in 25 ml of ethyl alcohol and 3.85 g (0.0034 mol) β -cyclodextrin in 40 ml of distilled water. The mixture is placed in a drying cabinet, ethanol and water are evaporated at 50-55 $^\circ\text{C}$, and 3-(3-methoxyphenethyl) propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with β -cyclodextrin ($5\beta\text{CD}$) inclusion complex is obtained in the form of a white powder. Yield 4.25 g (84 %). Calculated, %: C 52.56; H 6.79; N 1.89. $\text{C}_{65}\text{H}_{100}\text{N}_2\text{O}_{36}$. Found, %: C 52.59; H 6.77; N 1.92.

The complex of 3-(3-(1H-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with β -cyclodextrin ($6\beta\text{CD}$) is carried out in a similar way. Yield 5.95 g (88 %). Found, %: C 51.02; H 6.77; N 3.84. $\text{C}_{62}\text{H}_{98}\text{N}_4\text{O}_{35}$. Найдено, %: C 51.01; H 6.75; N 3.87.

2.2. The biological part

In the course of studies of myelostimulating activity, white female laboratory rats aged 12 to 16 weeks with a body weight of 210 to 280 grams were used. The blood test was performed on an Abacus junior vet hematology analyzer manufactured by Diatron, Denmark. The leukogram was monitored using Romanovsky-Giemse smear microscopy using a SA3300C microscope. The concentration of cells in the smear during immersion was 500 units. Myelosuppression was caused by the administration of cytostatic cyclophosphamide at a dose of 30 mg/kg of animal weight. Then, on the 6th, 8th and 10th days of follow-up, the rats were divided into 4 groups. Animals from group 1 were daily intramuscularly injected with the studied compound (6 β CD) under the code BIV-277 at a dose of 5 mg / kg in a volume of 0.5 ml. Rats from group 2 were injected with reference compounds, namely the drug methyluracil, at a dose of 0.4 mg / kg and a volume of 0.5 ml, group 3 received a placebo (physical solution) in a volume of 0.5 ml, and group 4 remained intact. Statistical processing of the data was carried out using Student's confidence interval.

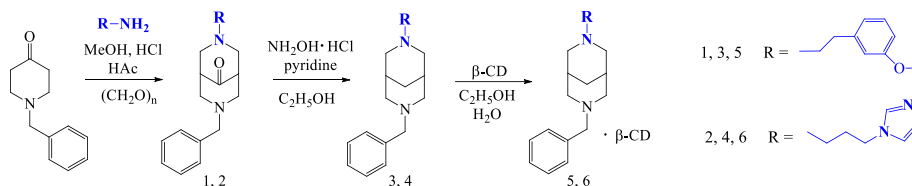
All experiments were conducted taking into account chronobiological principles and in full compliance with ethical standards for working with laboratory animals.

The study examined the effect of two substances (5 β CD, 6 β CD) — HZR-109 and HZR-112 — on stimulating the growth of seeds of spring wheat of the Kazakhstanskaya 10 variety and soybeans of the Zhansaya variety. The experiments were conducted in a laboratory setting. The seeds were germinated in moist chambers, after which they were planted in moistened soil. Germination was determined in four stages using 10 seeds in each repeat.

3. Results and discussion

In order to search for and isolate potentially biologically active substances, new bicyclic systems based on 2-(3-methoxyphenyl)ethanamine and 3-(1*H*-imidazole-1-yl)propane-1-amine were synthesized (Scheme 1). 3-(3-Methoxyphenyl)- and 3-(3-(1*H*-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane-9-ones 1, 2 were obtained from N-benzyl-4-oxopiperidine using a paraform and a corresponding primary amine in an acetic-methanol medium. The yield of products was 94-98 %. As a result of the reduction of the reaction products 1, 2 by the Kizhner-Wolf method using hydrazine hydrate in the presence of alkali in triethylene glycol, the corresponding bispidins (3, 4, with yields of 44-56 %) were synthesized. The resulting compounds are insoluble in water. To study their biological properties, complexes of these compounds with β -cyclodextrin were isolated. The complex of 3-(3-methoxyphenyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with β -cyclodextrin (5 β CD) was synthesized in 84 % yield. At the same time, the complex of 3-(3-(1*H*-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with β -cyclodextrin (6 β CD) was obtained in 88 % yield. The synthesis of these complexes was accompanied by the dissolution of

substances in a mixture of water and ethanol, prolonged heating in a sand bath, and subsequent ultrasound treatment. After all the procedures and drying, powdered products were obtained.



Scheme 1 - Synthesis of new bicyclic systems

In the IR spectra of 3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane-9-ones **1**, **2** there are absorption bands of the carbonyl group at 1707 cm^{-1} and 1733 cm^{-1} . In the ^{13}C NMR spectrum of compounds (**1**, **2**), the signals with the lowest chemical shift values at 214.32 ppm and 214.50 ppm were attributed to ketone carbon atoms (C-9), respectively. In the spectra, carbon atoms C-1 and C-5, as well as C-2, C-4, C-6 and C-8, which are marked in red, appeared at 54.32-58.17 and 58.42-61.25 ppm, respectively, and confirm the formation of target bispidinones. In the spectrum of the 2nd compound, it can be seen that the manifestations of imidazole carbon atoms that resonated at 119.02 ppm, 129.35 ppm and 137.43 ppm. Carbon atoms of the phenyl fragment were recorded at 112.00-159.98 and 127.03-137.96 ppm, respectively.

In the ^1H NMR spectrum of compounds **1**, **2**, imidazole protons appeared as single-proton doublets at 6.79-6.85, 6.93-7.02, and 7.35-7.42 ppm. Aromatic protons of the phenyl ring appeared as single-proton doublets in the region at 7.11-7.31 ppm and 6.40-7.11, 7.12-7.35 ppm. Methylene protons H-2ax,8ax,4ax,6ax and H-2eq, 8eq,4eq, and 6eq manifested as two four-proton multiplets at 2.42-2.81 and 2.89-3.11 ppm, respectively.

In the IR spectra of compounds **3**, **4**, the absorption bands of the C=O group are removed and absorption bands of the CH₂ bond appear, proving the formation of the corresponding bicyclic nonans. The absorption bands C-N and C=N groups are observed at 1510 cm^{-1} and $1070\text{--}1071\text{ cm}^{-1}$. The ^{13}C NMR spectra of nonanes **3**, **4** showed resonances for C-9 at 34.46 and 36.11 ppm, respectively. The signals of the carbon atoms of the bispidin framework appeared at 28.90-29.15 and 56.35-59.81 ppm. The carbon atom of the methoxyl fragment appeared at 55.52 ppm. The carbon atoms of the imidazole ring resonated in the range of 120.45-136.33 ppm, and the carbon atoms of the phenyl fragment in the range of 112.52-159.64 and 127.03-138.10 ppm.

The reaction products **3**, **4** were viscous oils, soluble only in organic solvents. Complexes 5 β CD, 6 β CD with β -CD were obtained as solids and used to study the biological properties of the synthesized compounds.

The complex $6\beta\text{CD}$ was studied for myelostimulating activity, which includes stimulation of erythropoiesis, leukopoiesis and thrombocytopoiesis. The study was conducted under the code BIV-277 (see Table 1).

Compound $6\beta\text{CD}$ BIV-277 demonstrated moderate activity against leukocytopoiesis, erythrocytopoiesis and thrombocytopoiesis.

Table 1 - Peripheral blood parameters

Blood counts*	BIV-277 ($6\beta\text{CD}$)	The control group	The placebo group	The intact group
RBC, $10^{12}/\text{l}$	8.09 ± 0.52	6.06 ± 0.06	3.59 ± 0.20	7.02 ± 0.23
HGB, g/l	125 ± 15.21	125 ± 4.00	96 ± 2.67	147 ± 6.00
HCT, %	37.37 ± 4.21	23.35 ± 0.70	20.75 ± 0.30	37.3 ± 0.27
MCV, fl	46 ± 4.58	54.45 ± 0.43	41.8 ± 0.07	82.6 ± 0.23
PLT, $10^9/\text{l}$	133 ± 5.55	521 ± 135.33	422 ± 41.33	690 ± 166.33
PCT, %	0.08 ± 0.00	0.2815 ± 0.07	0.23 ± 0.02	0.372 ± 0.08
MPV, fl	6.2 ± 0.01	6.1 ± 0.47	5.5 ± 0.13	7.4 ± 0.30
PDWS, %	9 ± 0.05	12.25 ± 0.57	11.25 ± 0.23	11.4 ± 0.43

*RBC – total erythrocyte count; HGB – hemoglobin; HCT – hematocrit; MCV- average volume of red blood cells; PLT – total platelet count; PCT – the amount of thrombocrit; MPV – average platelet volume; PDWS – platelet distribution index

The red blood cell level increased from $(3.59 \pm 0.2) \cdot 10^{12}/\text{l}$ of blood to $(8.09 \pm 0.52) \cdot 10^{12}/\text{l}$ of blood by 2.25 times, and the hemoglobin level recovered 1.3 times from $(96.0 \pm 2.67) \text{ g/l}$ of blood to $(125 \pm 15.21) \text{ g/l}$. The average volume of red blood cells increased from $(41.8 \pm 0.07) \text{ fl}$ to $(46 \pm 4.58) \text{ fl}$. Platelet mass and thrombocrit also showed a decrease in the number of platelets by 3.17 and 2.88 times to $(133 \pm 5.55) \cdot 10^9/\text{l}$ of blood and $(0.08 \pm 0.00) \%$, respectively. The average platelet volume increased by 1.13 times and amounted to $(6.2 \pm 0.01) \text{ fl}$.

The complexes of compounds $5\beta\text{CD}$, $6\beta\text{CD}$ under the codes HZR-109 and HZR-112 were studied in the laboratory for their stimulating effect on plant growth. The following indicators were determined during the study: germination energy, laboratory germination and germination intensity of seeds of Kazakhstanskaya 10 wheat and Zhansaya soybean (Table 2, Fig. 1).

Table 2 - The effect of the studied substances on germination, growth and development of wheat seed seedlings (Kazakhstanskaya 10) and soybeans (Zhansaya) in laboratory conditions

Variety	Options	Control	HZR-109 ($5\beta\text{CD}$)	HZR-112 ($6\beta\text{CD}$)
Kazakhstanskaya 10	Germination, %	90	100	100
	Seed germination energy, %	82.5	95.0	85.0
	Average height of plants, cm	9.5	8.0	8.0
Zhansaya	Germination, %	50	40	60
	Seed germination energy, %	45.0	35.0	50.0

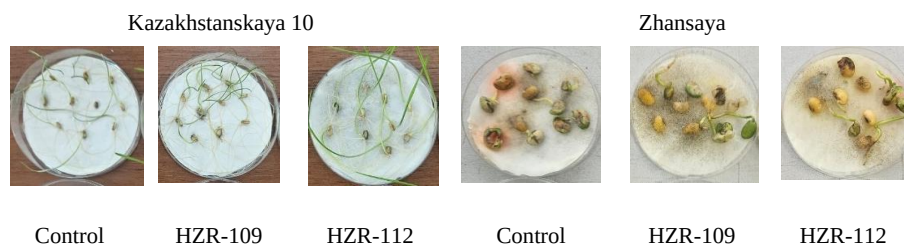


Figure 1 - Effect of HZR-109 and HZR-112 on germination, growth and development of wheat and soybean seedlings in laboratory conditions on day 7 of germination

During the study, it was found that the best results were obtained when using the complex (5β CD, HZR-112) for both types of wheat and soybean seedlings. The use of HZR-109 and HZR-112 preparations led to an increase in the germination energy of Kazakhstanskaya-10 wheat seeds by 85 and 95 %, respectively. When using HZR-109 and HZR-112, the average height of wheat plants of this variety was significantly lower than in the control group (treated with water) by 1.19 times. The germination rate and germination energy of soybean seeds of the Zhansaya variety treated with the HZR-109 preparation were lower compared with the control group. At the same time, when using the drug HZR-112, these indicators were 60 and 50 %, respectively.

4. Conclusion

As a result of the research, new bipidine-type systems based on 2-(3-methoxyphenyl)ethanamine and 3-(1*H*-imidazole-1-yl)propane-1-amine were synthesized. Then, the complexes of 3-(3-methoxyphenyl)- and 3-(3-(1*H*-imidazole-1-yl)propyl)-7-benzyl-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonans were obtained to study the biological activity with β -cyclodextrin. A study on myelostimulating activity showed that the complex (6β CD, BIV-277) reduces the number of platelet cells, while an increase in the level of erythrocyte cells, hemoglobin, and average platelet volumes was observed. This may indicate a moderate activity of the complex in relation to leukocytopoiesis, erythrocytopoiesis and thrombocytopoiesis. Biological screening conducted to determine the growth-stimulating activity showed that the complex (5β CD, HZR-112) stimulates plant growth on soybean seed seedlings. At the same time, the complex (6β CD, HZR-109) demonstrates inhibitory properties for all seed varieties.

Funding: This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22688235, AP19675500). The work was performed at the A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences.

Conflict of Interest: No conflict of interest.

МЕТОКСИФЕНЭТИЛ ЖӘНЕ ИМИДАЗОЛПРОПИЛ ФАРМАКОФОРЛЫ N-БЕНЗИЛБИСПИДИН: β -CD ЖАҢА ТУЫНДЫ КЕШЕНДЕРІНІҢ МИЕЛООЫНТАЛАНДЫРУШЫ ЖӘНЕ ӨСУДІ ЫНТАЛАНДЫРАТЫН БЕЛСЕНДІЛІГІН БАҒАЛАУ

А.Б. Қалдыбаева^{1,2,*}, В.К. Ю², А.А. Сергазы², Т.М. Сейлханов³,
Ф. Дурап⁴, М. Айдемир⁴, Н.С. Мухамадиев⁵

¹әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²«Ә.Б. Бектұров ат. Химия Ғылымдары Институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

³Ш. Уәлиханов ат. Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан

⁴Dicle Университеті, Диярбакыр, Түркия

⁵Ж. Жиёмбаев. ат. Қазақ өсімдіктерді қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа: Кіріспе. Жаңа биологиялық белсенді қосылыстарды іздеу дәрілік химияның негізгі мақсаттарының бірі болып қала береді. Осы зерттеудің мақсаты - қосылыстардың екі тобын - N-бензилбиспидин қаңқалы метоксифенетиламин және имидазолпропиламин туындыларын синтездеу және олардың өсімдіктердің өсуін реттеуші және миелоынталандырушы ретіндегі әлеуетін бағалау. Нәтижелер және талқылау. Дәстүрлі әдістерді қолдана отырып, 3,7-диазабицикло[3.3.1]нонан-9-ондардың жаңа сериялары синтезделді. Алынған қосылыстардың құрылымы ядролық магниттік-резонанстық спектроскопия (ЯМР), инфрақызыл спектроскопия және элементтік талдау арқылы расталды. Қорытынды. Биологиялық әлеуеті жоғары қосылыстарды анықтау мақсатында жаңа бициклді жүйелер синтезделді. Әрі қарай, алынған қосылыстардың β CD, β CD белсенділігін бағалау үшін зертханалық ақ аналық егеуқұйрықтарға миелоынталандырушылық және бидай мен соя тұқымына өсуді ынталандыру белсенділіктері жүргізілді. Миелоынталандырушы белсенділікті зерттеу нәтижелері бойынша имидазол туындысы, атап айтқанда 3-(3-(1H-имидазол-1-ил)пропил)-7-бензил-3,7-диазабицикло[3.3.1]нонанның β -циклодекстринмен кешені β CD 0,5 мл көлемінде 5 мг/кг дозада лейкоцитопозгге, эритроцитопозгге және тромбоцитопозгге қатысты орташа белсенділікті көрсетті. Өсуді ынталандыратын белсенділікті зерттеу нәтижелері бойынша кешеннің (β CD, ХЗР-112) соя тұқымының көшеттеріндегі өсімдіктердің өсуін ынталандыратынын көрсетті. Биспидин фрагментінің метоксифенэтилмен немесе имидазолпропилмен үйлесуі әр түрлі типтегі жаңа биологиялық белсенді субстраттарды іздеуде өте мақсатты болып табылды.

Түйін сөздер: 2-(3-метоксифенил)этанамин, 3-(1H-имидазол-1-ил)пропан-1-амин, бицикл, кешен, β -циклодекстрин, миелоынталандырушылық және өсуді ынталандырушы әсер.

Қалдыбаева Алтынай Бекболқызы	PhD
Ю Валентина Константиновна	Химия ғылымдарының докторы
Сергазы Аида Айдынқызы	Жаратылыстану ғылымдарының магистрі
Сейлханов Түлеген Муратович	Химия ғылымдарының кандидаты
Дурап Фияз	Химия ғылымдарының докторы
Айдемир Мурат	Химия ғылымдарының докторы
Мухамадиев Нуржан Серикжанович	Биология ғылымдарының кандидаты

N-БЕНЗИЛБИСПИДИН С МЕТОКСИФЕНЭТИЛОВЫМИ И ИМИДАЗОЛПРОПИЛОВЫМИ ФАРМАКОФОРАМИ: ОЦЕНКА МИЕЛОСТИМУЛИРУЮЩЕЙ И РОСТСТИМУЛИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ НОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ β -CD

**А.Б. Қалдыбаева^{1,2,*}, В.К. Ю², А.А. Сергазы², Т.М. Сейлханов³,
Ф. Дурап⁴, М. Айдемир⁴, Н.С. Мухамадиев⁵**

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан

³Кокиетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокиетау, Казахстан

⁴Университет Dicle, Диярбакыр, Турция

⁵Казахский научно-исследовательский институт защиты и карантина растений имени Ж. Жиембаев, Алматы, Казахстан

Аннотация: *Введение.* Поиск новых биологически активных соединений остается одной из ключевых задач медицинской химии. *Цель настоящего исследования* - синтезировать две группы соединений: производные метоксифенэтиламина и имидазолпропиламина с обязательным N-бензилбиспидиновым остовом и оценить их потенциал в качестве регуляторов роста растений и миелостимуляторов. *Результаты и обсуждение.* Были синтезированы новые серии 3,7-диазабицикло[3.3.1]нонан-9-онов с использованием традиционных методов. Структура полученных соединений была подтверждена с помощью спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР), инфракрасной спектроскопии и элементного анализа. *Заключение.* Синтезированы новые бициклические системы с целью выявления соединений с высоким биологическим потенциалом. Была проведена оценка миелостимулирующей на лабораторных белых крысах-самках и ростстимулирующей на семенах пшеницы и сои активности полученных соединений 5 β CD, 6 β CD. Результаты исследования миелостимулирующей активности показали, что производное имидазола, а именно комплекс 3-(3-(1H-имидазол-1-ил)пропил)-7-бензил-3,7-диазабицикло[3.3.1]нонана с β -циклодекстрином 6 β CD, в дозе 5 мг/кг в объеме 0,5 мл проявляет умеренную активность в отношении лейкоцитопоза, эритроцитопоза и тромбоцитопоза. Результаты исследования ростстимулирующей активности показали, что комплекс (5 β CD, ХЗР-112) стимулирует рост растений на проростках семян сои. Оказалось, что комбинация биспидинового фрагмента с метоксифенэтилом или имидазолпропилом весьма перспективна для поиска новых биологически активных субстратов разнообразного типа действия.

Ключевые слова: 2-(3-метоксифенил)этанамин, 3-(1H-имидазол-1-ил)пропан-1-амин, бицикл, комплекс, β -циклодекстрин, миелостимулирующее и ростстимулирующее действие.

Қалдыбаева Алтынай Бекболқызы	PhD
Ю Валентина Константиновна	Доктор химических наук
Сергазы Аида Айдынкызы	Магистр естественных наук
Сейлханов Тулеген Муратович	Кандидат химических наук
Дурап Фияз	Доктор химических наук
Айдемир Мурат	Доктор химических наук
Мухамадиев Нуржан Серикжанович	Кандидат биологических наук

References

1. Dziduch K., Janowska S., Andrzejczuk S., Strzyga-Lach P., Struga M., Feldo M., Demchuk O., Wujec M. Synthesis and biological evaluation of new compounds with nitroimidazole moiety. *Molecules*, **2024**, Vol. 29, 3023. DOI: 10.3390/molecules29133023
2. Muhammed T., Aki-Yalcin E. Pharmacophore modeling in drug discovery: methodology and current status. *JOTCSA*, **2021**, Vol. 8. P. 749-762. DOI: 10.18596/jotcsa.927426
3. Kotliarova A.A., Ponomarev K.Y., Morozova E.A., Suslov E.V., Pavlova A.V., Tolstikova T.G., Volcho K.P., Salakhutdinov N.F. 3,7-Diazabicyclo[3.3.1]nonanes and 1,3-diazaadamantanes containing monoterpenoid moieties as synthetic adaptogens: synthesis, ADMET predictions, and in vivo biological activity. *Med. Chem. Res.*, **2025**, Vol. 34. P. 1347-1363. DOI: 10.1007/s00044-025-03414-4
4. Kaldybayeva A.B., Yu V.K., Durap F., Aydemir M., Tassibekov K.S. Metal complexes of bispidine derivatives: Achievements and prospects for the future. *Molecules*, **2025**, Vol. 30, 1138. DOI: 10.3390/molecules30051138
5. Sacchetti A., Rossetti A. Synthesis of natural compounds based on the [3,7]-diazabicyclo[3.3.1]nonane (bispidine) core. *Eur. J. Org. Chem.*, **2021**, Vol. 10. P. 1491-1507. DOI: 10.1002/ejoc.202001439
6. Lavrov M.I., Karlov D.S., Voronina T.A., Grigoriev V.V., Ustyugov A.A., Bachurin S.O., Palyulin V.A. Novel positive allosteric modulators of AMPA receptors based on 3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane scaffold. *Mol. Neurobiol.*, **2020**, Vol. 57. P. 191-199. DOI: 10.1007/s12035-019-01768-6
7. Slman D.K., Satar H.A., Ketan Z.A., Jawad A.A. Heterocyclic compounds: A study of its biological activity. *ANJS* 27, **2024**, Vol. 2. P. 19-24. DOI: 10.22401/ANJS.27.5.03
8. Kaldybayeva A.B., Malmakova A.Ye., Li T.E., Ten A.Yu., Seilkhanov T.M., Praliyev K.D., Yu V.K., Berlin K.D. Complexes of 3-[3-(1*H*-imidazol-1-yl)propyl]-3,7-diazabispidines and β -cyclodextrin as coatings to protect and stimulate sprouting wheat seeds. *Molecules*, **2022**, Vol. 27, 7406. DOI: 10.3390/molecules27217406
9. Naveena P., Sravani R., Siddhardha U., Suresh V., Rani G.T. Imidazole derivatives: Synthetic strategies, pharmacological potential, and future directions. *Int. J. Pharm. Sc.*, **2025**, Vol. 3, 250305427. DOI: 10.5281/zenodo.15564146
10. Sycheva E.S., Markina D.B., Mukanova M.S., Boltayeva L.A., Seilkhanov O.T. Synthesis, bactericidal and fungicidal activity of N-(4-methoxyphenyl)acetamide and N-phenylacetamide derivatives. *Chem. J. Kaz.*, **2023**, Vol. 81, 15-23. DOI: 10.51580/2023-1.2710-1185.02
11. Neborak E.V., Kaldybayeva A.B., Bey L., Malmakova A.Y., Tveritinova A.S., Hilal A., Yu V.K., Ploskonos M.V., Komarova M.V., Agostinelli E., Zhdanov D.D. Anticancer cytotoxic activity of bispidine derivatives associated with the increasing catabolism of polyamines. *Molecules*, **2022**, Vol. 27, 3872. DOI: 10.3390/molecules27123872
12. Ahmadi A., Mohammadnejadi E., Karami P., Razzaghi-Asl N. Current status and structure activity relationship of privileged azoles as antifungal agents (2016-2020). *Int. J. Antimicrob. Agents*, **2022**, Vol. 59, 106518. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2022.106518
13. Sadeghian S., Bekhradi F., Mansouri F., Razmi R., Mansouri S.G., Poustforoosh A., Khabnadideh S., Zomorodian K., Zareshahrabadi Z., Rezaei Z. Imidazole derivatives as novel and potent antifungal agents: Synthesis, biological evaluation, molecular docking study, molecular dynamic simulation and ADME prediction. *J. Mol. Struct.*, **2024**, Vol. 1302, 137447. DOI: 10.1016/j.molstruc.2023.137447

ISOLATION OF RICE HUSK OIL AND PREPARATION OF FATTY ACID MONOGLYCERIDES

B.G.Alimkhan, S.A.Kanzhar, A.S.Tapalova, A.B.Toibazarova, A.T.Shuragazyeva, N.A.Akhatayev, B.B.Abzhalelov, N.O.Appazov*

Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: nurasar.82@korkyt.kz*

Abstract. Rice husk, a widespread by-product of agro-industrial production, contains residual vegetable oils rich in unsaturated fatty acids. In this study, an eco-friendly and efficient strategy is presented for converting rice husk biomass into monoglycerides — compounds of significant industrial relevance. The process began with extraction of the raw material in a semi-automatic Soxhlet apparatus (ASV-6M) using ethyl acetate, which demonstrated the highest efficiency among six tested solvents, providing an oil yield of up to 2.82%. The obtained oil was subjected to catalytic glycerolysis under moderate pressure and temperature conditions (220 °C, 4 h) in the presence of potassium hydroxide, resulting in approximately 68.87% monoglyceride formation. Product purification was carried out by a two-step method: crystallization in an acetone–water system followed by column chromatography on silica gel, which enabled isolation of monoglycerides with a purity of up to 93%. Structural and compositional analyses were performed using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) and infrared (IR) spectroscopy, which confirmed the presence of key esters — monoglycerides of palmitic and oleic acids. Mass spectrometry data confirmed molecular weights consistent with the structures of the monoglycerides, while the IR spectra revealed characteristic absorption bands corresponding to ester and hydroxyl functional groups.

Keywords: rice husk; extraction; vegetable oil; monoglycerides of palmitic and oleic acid.

Alimkhan Bekzhan Galymzhanuly	<i>Bachelor of Technical Sciences; E-mail: mortalbeka@gmail.com</i>
Kanzhar Saken Alimuly	<i>Bachelor of Technical Sciences; E-mail: sakenkanzhar@gmail.com</i>
Tapalova Anipa Seidalykyzy	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: Tapalova_A@korkyt.kz</i>
Toibazarova Altynkul Bakytzyzy	<i>Master of Sciences; E-mail: toibazarovaaltynkul@gmail.com</i>
Shuragazyeva Assel Torebekkyzy	<i>Master of Technical Sciences; E-mail: assel.290982@mail.ru</i>
Akhatayev Nurllybek Akarystanuly	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: nurlibek.83@mail.ru</i>
Abzhalelov Bakhytbek Baidosuly	<i>Candidate of Biological Sciences; E-mail: bakhytbek@korkyt.kz</i>
Appazov Nurbol Orynbasaruly	<i>Candidate of Chemical Sciences, professor; E-mail: nurasar.82@korkyt.kz</i>

Citation: Alimkhan B.G., Kanzhar S.A., Tapalova A.S., Toibazarova A.B., Shuragazyeva A.T., Akhatayev N.A., Abzhalelov B.B., Appazov N.O. Isolation of rice husk oil and preparation of fatty acid monoglycerides. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 41-51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.49>

ВЫДЕЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ПОЛУЧЕНИЕ МОНОГЛИЦЕРИДОВ ЖИРНЫХ КИСЛОТ НА ЕГО ОСНОВЕ

Б.Г. Алимхан, С.А. Канжар, А.С. Тапалова, А.Б. Тойбазарова, А.Т. Шурагазиева, Н.А. Ахатаев, Б.Б. Абжалелов, Н.О. Аппазов*

Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан

Аннотация. Рисовая шелуха, являющаяся массовым отходом агропромышленного производства, содержит остаточные растительные масла, богатые ненасыщенными жирными кислотами. В данной работе представлена экологически безопасная и эффективная стратегия преобразования биомассы рисовой шелухи в моноглицериды – соединения, имеющие важное промышленное значение. Процесс начинался с экстракции сырья в полуавтоматическом аппарате Сокслета (АСВ-6М) с использованием этилацетата, который показал наибольшую эффективность среди шести протестированных растворителей, обеспечив выход масла до 2.82%. Полученное масло подвергали каталитической реакции глицеролиза при умеренных условиях давления и температуры (220 °C, 4 часа) в присутствии гидроксида калия, что привело к образованию около 68.87% моноглицеридов. Для очистки продукта применяли двухэтапный метод: кристаллизацию в системе ацетон-вода и последующую колоночную хроматографию на силикагеле, что позволило выделить моноглицериды с чистотой до 93%. Структурный и компонентный анализ выполняли методами газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) и инфракрасной спектроскопии (ИК), которые подтвердили присутствие ключевых эфиров – моноглицеридов пальмитиновой и олеиновой кислот. Данные масс-спектрометрии подтвердили молекулярные массы, соответствующие структурам моноглицеридов, а ИК-спектры выявили характерные полосы поглощения, относящиеся к сложнэфирным и гидроксильным функциональным группам.

Ключевые слова: рисовая шелуха; экстракция; растительное масло; моноглицериды пальмитиновой и олеиновой кислот.

<i>Алимхан Бекжан Галымжанулы</i>	<i>бакалавр технических наук</i>
<i>Канжар Сакен Алимұлы</i>	<i>бакалавр технических наук</i>
<i>Тапалова Анина Сейдалықызы</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Тойбазарова Алтынкуль Бакытқызы</i>	<i>магистр наук</i>
<i>Шурагазиева Асель Торебекқызы</i>	<i>магистр технических наук</i>
<i>Ахатаев Нурлыбек Акарыстанұлы</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Абжалелов Бакытбек Байдосұлы</i>	<i>кандидат биологических наук</i>
<i>Аппазов Нурбол Орынбасарұлы</i>	<i>кандидат химических наук, профессор</i>

1. Введение

Устойчивое использование агропромышленных отходов – ключевое направление зелёной химии. Рисовая шелуха составляет около 20 % мирового производства риса (более 150 млн т/год) [1]. Ранее считавшаяся отходом, она привлекает внимание благодаря содержанию кремнезёма, целлюлозы и липидов [2]. Липиды являются ценным сырьём для синтеза глицеридов, применяемых как эмульгаторы и стабилизаторы в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности [3,4].

Содержание масла в шелухе достигает 21.44 %, основными компонентами являются олеиновая, линолевая и пальмитиновая кислоты [5]. Производство моноглицеридов традиционно основано на растительных

маслах [6]. Разработаны экологичные методы их получения: щелочной глицеролиз этиловых эфиров (выход до 76 %) [7], глицеролиз в сверхкритическом CO_2 (выход до 49 %) [5], а также каталитические процессы с использованием CaO и MgO при 220 °C [8] или ионных жидкостей (выход свыше 69 %) [9,10].

Предложенный подход основан на извлечении масла из шелухи и его глицеролизе с получением биоэмульгаторов при мягких условиях и высокой селективности [11]. Рисовая шелуха содержит 30–35 % целлюлозы, 15–25 % лигнина и до 95 % SiO_2 в золе, что делает её ценным сырьём [2]. Она используется в удобрениях, строительных материалах, адсорбентах, топливе и для производства биоэтанола [3,12]. Наиболее эффективны методы экстракции растворителями, сверхкритическими жидкостями и ультразвуком [13,14], позволяющие получить масла с антиоксидантной активностью [15,16].

2. Экспериментальная часть

Экстракция органических соединений. Экстракцию органических соединений проводили методом Сокслета с использованием 30 г рисовой шелухи и 250 мл растворителя (ацетон, гексан, хлороформ, этилацетат, ксилол, бензол) при температуре кипения в течение 5 ч. После удаления растворителя экстракт взвешивали и рассчитывали выход. Наиболее эффективным оказался этилацетат.

Реакция глицеролиза. 50 г масла из шелухи смешивали с 25 г глицерина и 0,75 г катализатора (CaO , NaOH или KOH), реакцию проводили в автоклаве при 220 °C 4 ч под азотом. После охлаждения до 160 °C смесь нейтрализовали фосфорной кислотой, фильтровали и декантировали.

Очистка моноглицеридов. Смесь глицеридов растворяли в системе ацетон-вода (3:1), охлаждали до 5–10 °C, удаляли ди- и триглицериды фильтрацией, моноглицериды очищали колоночной хроматографией на силикагеле, получая до 93 % чистого продукта.

Аналитические методы. Состав определяли методом ГХ-МС (Agilent 7890A/5975C). Условия хроматографии: подвижная фаза (газ-носитель) – гелий; температура инжектора – 325 °C, коэффициент деления потока 1000:1; программирование температуры колонки: начальная 50 °C (1 мин), подъем 5 °C/мин до 280 °C, выдержка 5 мин; общее время анализа – 53 мин. Детектор масс-спектрометра работал в режиме электронной ионизации. Использовалась капиллярная колонка HP-5MS, длина 30 м, внутренний диаметр 0.25 мм, неподвижная фаза – 95% полидиметилсилоксан и 5% фенилметилполисилоксан.

ИК-спектры регистрировали на спектрометре IR-Prestige 21 (Shimadzu, Япония, 2008) в диапазоне длин волн 400–4000 cm^{-1} без специальной подготовки образцов, с использованием приставки для ИК-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения (ATR) DuraSampl IR

II с одиночным отражением (алмазный кристалл на подложке из ZnSe) производства Smiths (США).

3. Результаты и обсуждение.

Эффективность экстракции. Наибольший выход масла обеспечил этилацетат (2.82 %), затем ацетон (2.21 %) и хлороформ (2.12 %). Неполярные растворители показали низкие результаты.

Таблица 1 - Выход вещества в различных растворителях

№	Растворитель	Вес рисовой шелухи, г	Объем растворителя, мл	Масса полученного вещества, г	Выход вещества, %
1	Этилацетат	30	250	0.8454	2.821
2	Ацетон			0.6617	2.206
3	Хлороформ			0.6348	2.116
4	Гексан			0.5421	1.807
5	Ксилол			0.5403	1.801
6	Бензол			0.4886	1.628

Полученное растительное масло было проанализировано с использованием ИК-спектрометра (рисунок 1). В ИК-спектре масла наблюдаются характерные полосы поглощения: полоса поглощения карбонильной группы при 1743 см^{-1} и интенсивная полоса при 1161 см^{-1} , соответствующая колебаниям сложноэфирной связи C–O.

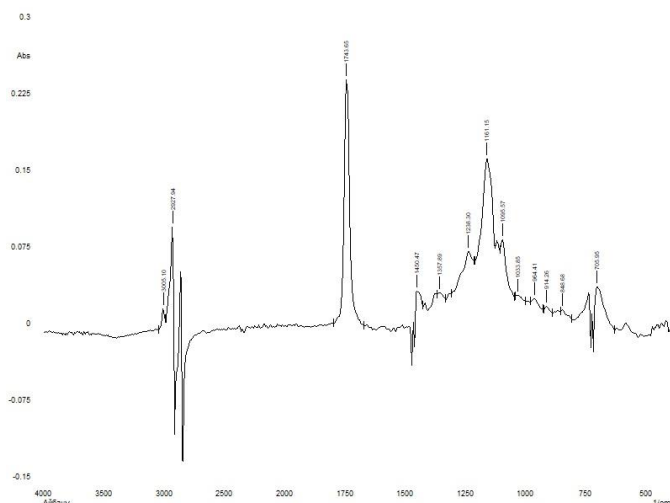


Рисунок 1 - ИК-спектр растительного масла, полученного экстракцией из рисовой шелухи.

Глицеролиз. Глицеролиз — обратимая реакция триглицеридов с глицерином с образованием моно- и диглицеридов. На выход влияют температура, время, соотношение реагентов и катализатор. В работе исследованы CaO, NaOH и KOH, различающиеся основностью и растворимостью, что определяет кинетику реакции [17].

Процесс проводили при 220 °C, 4 ч, соотношении масло:глицерин = 2:1 и 1.5 % катализатора в автоклаве под азотом. Наибольший выход (68 %) обеспечил KOH благодаря высокой растворимости и сильной основности. Для CaO выход составил ~66 %, для NaOH – 57 %; их меньшая активность и низкая растворимость снижали эффективность, а CaO вызывал образование осадка, усложняя очистку.

Таблица 2 - Выход моноглицерида после глицеролиза

Катализатор	Рисовое масло, г	Глицерин, г	Масса катализатора, г	Выход, %	Выход, г	Объем растворителя Ацетон + вода, мл
CaO	50	25	0,75	67.44	33.72	487.5
NaOH	50	25	0,75	57.68	28.84	487.5
KOH	50	25	0,75	68.87	34.43	487.5

После глицеролиза смесь содержала моно-, ди-, триглицериды, глицерин и примеси, поэтому требовалась высокая чистота моноацилглицеридов для пищевых и фармацевтических целей [18]. Первым этапом проводили селективную кристаллизацию в системе ацетон–вода (3:1) с охлаждением до 5–10 °C, что обеспечивало осаждение ди- и триглицеридов и сохранение моноглицеридов в растворе [19–21]. После фильтрации раствор обогащали методом колоночной хроматографии на силикагеле с элюированием хлороформом, что давало фракцию до 93 % моноглицеридов [22].

Состав подтверждали ГХ–МС и ИК–Фурье спектроскопией. Хроматограмма показывала два пика (45 и 52 мин), соответствующих моноглицеридам пальмитиновой и олеиновой кислот; отсутствие ранних пиков указывало на высокую чистоту продукта.

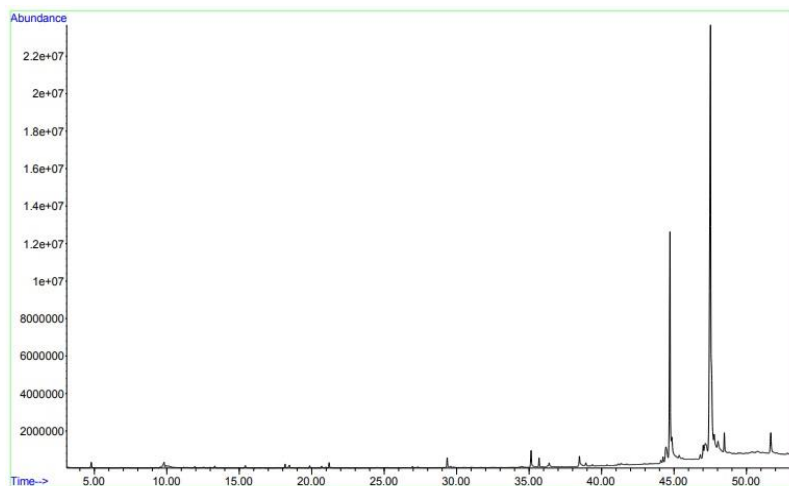


Рисунок 2 - Хроматограмма смеси моноглицеридов.

Масс-спектр (Рисунок 3) показывает пики, подтверждающие наличие моноглицерида пальмитиновой кислоты. Основной ион при $m/z = 299.3$ соответствует её молекулярной массе (330 г/моль). Содержание в образце – 27.18%.

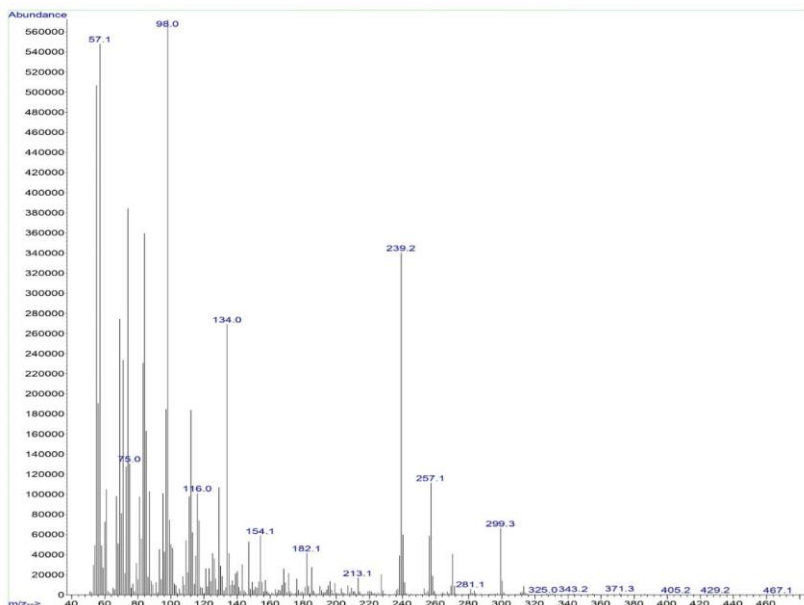


Рисунок 3 - Масс-спектр моноглицерида олеиновой кислоты.

В масс-спектре моноглицерида пальмитиновой кислоты наблюдаются интенсивные пики m/z 57, 75 и 98 (глицериновый фрагмент) и m/z 239, 257, 281 (пальмитиновая цепь), что подтверждает образование целевого моноглицерида и согласуется с литературными данными.

Спектр моноглицерида олеиновой кислоты (Рисунок 4) демонстрирует молекулярный ион $[M]^+$ при m/z 356.3, соответствующий формуле $C_{21}H_{40}O_4$. Характерные пики m/z 55, 77, 98 (алифатическая цепь), 137, 165 (глицериновый остов) и 221 (частичное отщепление цепи) подтверждают структуру соединения. Слабые пики 280–325 и основной сигнал m/z 264 соответствуют продуктам фрагментации и подтверждают правильность идентификации; содержание моноглицерида составило 72.82 %.

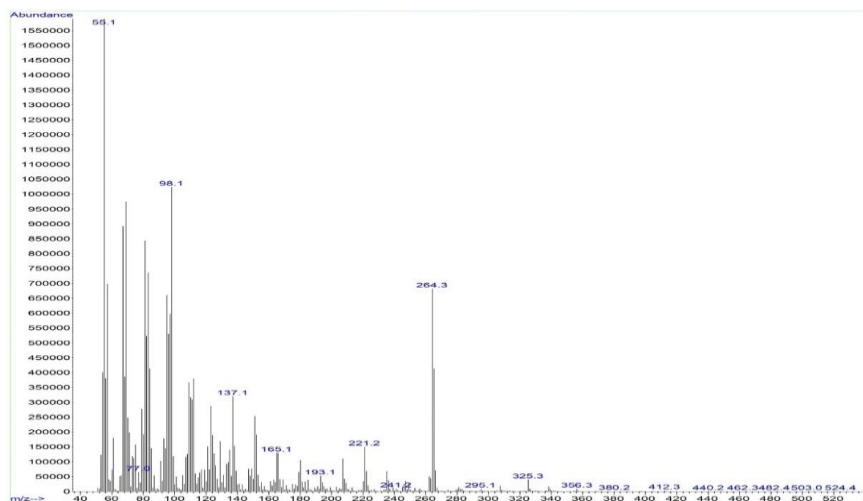


Рисунок 4 - Масс-спектр моноглицерида олеиновой кислоты.

Молекулярные массы соединений, определённые масс-спектрометрией, совпали с расчетными. Спектры (рис. 5) показали характерные пики, подтверждающие структуру моноглицеридов [23-24]. В ИК-спектрах отмечено поглощение карбонильных групп ($\approx 1735\text{ см}^{-1}$) и широкая полоса $3000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, соответствующая гидроксильным группам.

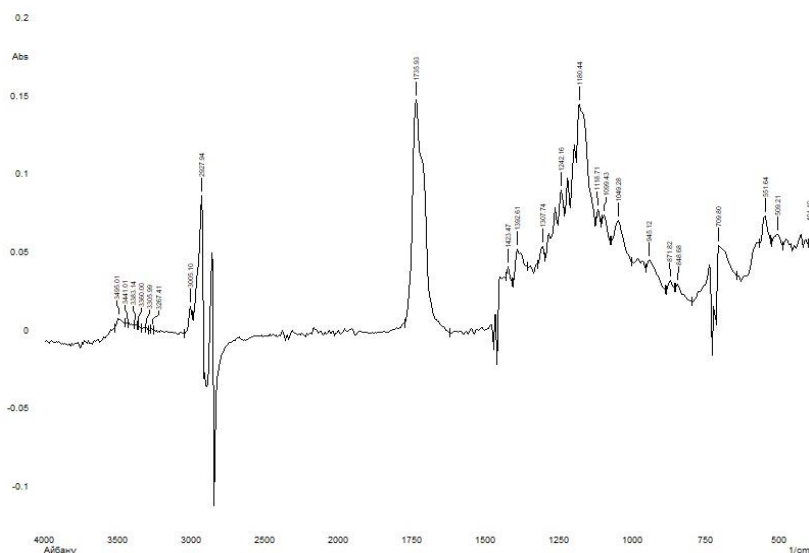


Рисунок 5 - ИК-спектр смеси моноглицеридов пальмитиновой и олеиновой кислот.

Предложенный метод, основанный на селективном осаждении и хроматографической очистке, обеспечивает получение высокоочищенных моноглицеридов, пригодных для применения в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности.

4. Заключение.

Исследование демонстрирует экологически ориентированный подход к получению функциональных липидов из рисовой шелухи. Экстракция в аппарате Сокслета показала, что наибольший выход масла (2.82%) достигается при использовании этилацетата, что делает его ценным сырьём для дальнейших превращений.

Глицеролиз масла исследован с участием катализаторов CaO, NaOH и KOH; наилучший результат дал KOH с выходом моноглицеридов до 47% при 220 °C за 4 ч. Для очистки применены селективная кристаллизация и колоночная хроматография, обеспечившие чистоту моноглицеридов до 93%, что соответствует требованиям пищевой и фармацевтической промышленности.

Структура и чистота подтверждены ГХ–МС и ИК-спектроскопией, установлено присутствие моноглицеридов пальмитиновой и олеиновой кислот.

Благодарность. Авторы благодарят Лабораторию инженерного профиля НАО «Кызылординский университет им. Коркыт Ата» за техническую поддержку проведенных исследований.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490056), а также в рамках проекта PhytoAPP EU (2021–2025) при поддержке Европейского Союза по программе HORIZON 2020 в соответствии с грантовым соглашением Марии Склодовской-Кюри № 101007642.

Конфликт интересов: Конфликт интересов между авторами отсутствует.

КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН МАЙ БӨЛІП АЛУ ЖӘНЕ МАЙ ҚЫШҚЫЛДАРЫНЫҢ МОНОГЛИЦЕРИДТЕРІН АЛУ

**Б.Г.Алимхан, С.А.Қанжар, А.С.Тапалова, А.Б.Тойбазарова, А.Т.Шурагазиева,
Н.А.Ахатаев, Б.Б.Абжалелов, Н.О.Аппазов***

Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

Түйіндеме. Күріш қауызы, агроөнеркәсіптік өндірістің жаппай қалдығы болып табылатын, қанықпаған май қышқылдарына бай өсімдік майларының қалдықтарын қамтиды. Бұл жұмыста күріш қауызы биомассасын өнеркәсіптік маңызы зор қосылыстар – моноглицеридтерге экологиялық қауіпсіз және тиімді түрлендіру стратегиясы ұсынылған. Сокслет жартылай автоматты аппараты (АСВ-6М) көмегімен шикізатты этилацетатында экстракциялаудан басталды, ол сынақтан өткен алты еріткіштің ішінде ең жоғары тиімділікті көрсетіп, майдың шығымын 2.82%-ға дейін қамтамасыз етті. Алынған май орташа қысым мен температура жағдайларында (220 °C, 4 сағат) калий гидроксиді қатысында глицеролиздің каталитикалық реакциясына ұшыратылды, нәтижесінде шамамен 68.87% моноглицеридтер түзілді. Өнімді тазарту үшін екі сатылы әдіс қолданылды: ацетон-су жүйесінде кристалдандыру және одан кейін силикагельде бағаналы хроматография көмегімен бөлу, бұл моноглицеридтерді 93%-ға дейінгі тазалықпен бөліп алуға мүмкіндік берді. Құрылымдық және компоненттік талдау газды хромато-масс-спектрометрия және инфракызыл спектроскопия әдістерімен жүргізілді, олар негізгі эфирлердің – пальмитин қышқылы мен олеин қышқылы моноглицеридтерінің бар екенін растады. Масс-спектрометрия деректері моноглицеридтердің құрылымына сәйкес келетін молекулалық массаларды растады, ал ИК-спектрлері күрделі эфирлік және гидроксилдік функционалды топтарға тән жұтылу жолақтарын анықтады.

Түйін сөздер: күріш қауызы; экстракция; өсімдік майы; пальмитин және олеин қышқылдарының моноглицеридтері.

<i>Алимхан Бекжан Ғалымжанұлы</i>	<i>техникалық ғылымдар бакалавры</i>
<i>Қанжар Сәкен Әлімұлы</i>	<i>техникалық ғылымдар бакалавры</i>
<i>Тапалова Анипа Сейдалықызы</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
<i>Тойбазарова Алтынқұл Бақытқызы</i>	<i>ғылым магистрі</i>
<i>Шурагазиева Әсел Төребекқызы</i>	<i>техникалық ғылымдар магистрі</i>
<i>Ахатаев Нұрлыбек Ақарыстанұлы</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Абжалелов Бақытбек Байдосұлы</i>	<i>биология ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Аппазов Нұрбол Орынбасарұлы</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>

References

1. Chen H., Wang H., Xu C., Zhang S., Li Z., Huang Y., Huang G. Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, **2024**, 31(1), 14–32. DOI: 10.1016/j.rsci.2023.08.005.
2. Murugesan A., Balamurugan K., Gowthaman., Mohammed Shabeer R., Abishek R. Investigation on production of edible oil from rice husk. *Journal of Manufacturing Engineering*, **2022**, 17(4), 153–159.
3. Zhang H., Xu C., Lu Y., Hansen I., Yin H. Lipophilic compounds from maize fiber and rice husk residues – An overview. *Journal of Biotechnology*, **2020**, 305, 115–125. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.01.019.
4. Liu H., Yang J., Xu Y., Wen J., Zhou J., Xu Z., Li J., Sun X., Si W. Effects of glycerol monooleate on improving quality characteristics and baking performance of frozen dough breads. *Foods*, **2025**, 14(2), 326. DOI: 10.3390/foods14020326.
5. Temelli F., Halley P., Stout J.E., Cremaschi P., Neveu C. Conversion of oils to monoglycerides by glycerolysis in supercritical carbon dioxide. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **1996**, 73(3), 385–390. DOI: 10.1007/BF02517943.
6. Nitbani F.O., Tjitda P.J.P., Nurohmah B.A., Wogo H.E. Preparation of fatty acid and monoglyceride from vegetable oil. *J. Oleo Sci.*, **2020**, 69(4), 277–295. DOI: 10.5650/jos.ess19168.
7. Hobuss C.B., da Silva F.A., dos Santos M.A.Z., de Pereira C.M.P., Schulz G.A.S., Bianchini D. Synthesis and characterization of monoacylglycerols through glycerolysis of ethyl esters derived from linseed oil by green processes. *RSC Adv.*, **2020**, 10(4), 2327–2336. DOI: 10.1039/C9RA07834G.
8. Temelli F., Brennecke J.F., Magda J.J. Kinetic modeling of glycerolysis for soybean oil in supercritical CO₂. *J. Supercrit. Fluids*, **2005**, 34(2), 181–188. DOI: 10.1007/s11746-005-1118-x.
9. Wei T., Zhang S., Zhong J., Duan P., Wang Y. Monoacylglycerol synthesis by glycerolysis of soybean oil using alkaline ionic liquid. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2015**, 54(18), 4944–4951. DOI: 10.1021/ie5049548.
10. Mu J., Harris C., Tay E.-H. Enhanced glycerolysis of fatty acid methyl ester by static mixer: kinetic analysis and optimal conditions for monoglyceride and diglyceride production. *ACS Omega*, **2024**, (Early Access). DOI: 10.1021/acsomega.4c04858.
11. Neji S.B., Chaari A., Ladero Galán M., Frikha F., Bouaziz M. Application of Box–Behnken design in production of monoglyceride with esterification of glycerol and oleic acid. *ACS Omega*, **2023**, 8(31), 28813–28820. DOI: 10.1021/acsomega.3c03772.
12. Fathurahman R., Surjosatyo A. Utilization of rice husks as a fuel for gasification – A review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **2022**, 1034, 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/1034/1/012065.
13. Yuan Y., Yue Q., Gao B. A comprehensive review on the utilization of rice husk and its bioactive compounds for industrial applications. *J. Clean. Prod.*, **2020**, 277, 123978. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123978.
14. Mehta R., Bahadur D., Tiwari A. Soxhlet extraction of bioactive compounds from agro-waste: Efficiency and kinetics. *Ind. Crops Prod.*, **2019**, 139, 111519. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111519.
15. Kaur S., Ubeyitogullari A. Extraction of phenolic compounds from rice husk via ethanol-water-modified supercritical carbon dioxide. *Heliyon*, **2023**, 9(3), e14196. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14196.
16. Satyawali Y., Cauwenberghs L., Maesen M., Dejonghe W. Lipase catalyzed solvent free synthesis of monoacylglycerols in the presence of pervaporation for water removal. *Chem. Eng. Process.*, **2021**, 166, 108475. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108475.
17. Silveira D.G., Sampaio R.M., Sant’Ana H.B. Production of mono- and diglycerides via glycerolysis using alkaline earth metal oxides as catalysts. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2015**, 54(18), 4944–4951. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b00317.
18. Gomes J.F., Souza A.G., Fernandes V.J. Efficient production of monoglycerides from vegetable oils by glycerolysis using heterogeneous base catalysts. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **2019**, 96, 131–143. DOI: 10.1002/aocs.12184.
19. Luo H., Zhai Z., Fan W., Cui W., Nan G., Li Z. Monoacylglycerol synthesis by glycerolysis of soybean oil using alkaline ionic liquid. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2015**, 54(18), 4923–4928. DOI: 10.1021/ie5049548.

-
20. Ghanbari R., Ghaedi M., Asfaram A., Hajati S. Separation of monoglycerides using adsorption chromatography: A comparative study. *Sep. Purif. Technol.*, **2018**, 199, 97–105. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.01.050.
21. Beltrán M.T., Sanz M.T., Beltrán S. Purification of monoacylglycerols by column chromatography: A green process approach. *J. Chromatogr. A*, **2016**, 1453, 105–113. DOI: 10.1016/j.chroma.2016.05.070.
22. Hobuss C.B., da Silva F.A., dos Santos M.A.Z., de Pereira C.M.P., Schulz G.A.S., Bianchini D. Synthesis and characterization of monoacylglycerols through the glycerolysis of ethyl ester mixture (biodiesel) from linseed oil. *RSC Adv.*, **2020**, 10(4), 2327–2336. DOI: 10.1039/C9RA07834G.
23. Kralova I., Sjöblom J. Analytical methods in lipid research: IR and MS techniques in the characterization of mono- and diglycerides. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2009**, 146(1–2), 1–14. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.001.
24. Zeng J., Liu Yu-xuan., Li Fang., Liu Jian-ming., Wang Liang., Xu Hui. Identification of monoglycerides and diglycerides by GC-MS and FT-IR techniques. *Food Chem.*, **2013**, 141(3), 3606–3611. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.06.029.

BIOREMEDIATION OF HERBICIDE-CONTAMINATED SOILS

P.Sh. Mammadova, E.R. Babayev, K.R. Qahramanova, F.Q. Mushtagova*

*A.M. Kuliyeв Institute of Chemistry of Additives of Ministry of Sciences and Education
of Azerbaijan Republic, Baku*

**Corresponding author e-mail: elbeibabaev@yahoo.de*

Abstract. Contamination of soils, groundwater, and surface water with herbicides poses significant cleanup challenges. Currently, the most common approach is containment, which involves expensive disposal of heavily contaminated soils to landfills. Bioremediation methods for in-situ treatment are needed as alternative and/or complementary approaches for cost-effective, waste-free cleanup. Microbes can be used to remediate herbicide-contaminated soil through a process called bioremediation, in which microorganisms degrade or convert contaminants into less harmful ones. This process can occur naturally or be enhanced by adding certain microorganisms or nutrients to the soil. Microorganisms such as bacteria and fungi have enzymes that can break down herbicides into less toxic compounds. They often use these herbicides as a food source. Remediation can be done in situ or by removing the soil for treatment (ex situ). Microbial remediation is influenced by the following factors: microbial activity (the type and number of microorganisms present and their ability to degrade a particular herbicide); environmental conditions (factors such as temperature, humidity, pH, and nutrient availability can affect the growth and activity of microorganisms); herbicide properties (the chemical structure and concentration of the herbicide can affect its biodegradability); soil properties (soil type, organic matter content, and aeration can affect microbial activity and the bioavailability of the herbicide).

Key words: bioremediation, microbes, herbicides, bioavailability, biodegradability, reclamation.

<i>Mammadova Parvin Shamkhal</i>	<i>Doctor of Chemical Sciences; E-mail: pervin_mammadova@mail.ru</i>
<i>Babayev Elbey Rasim</i>	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: elbeibabaev@yahoo.de</i>
<i>Kahramanova Konul Rasim</i>	<i>Doctorant; E-mail: qehremanovakr@gmail.com</i>
<i>Mushtagova Fidan Qalib</i>	<i>Doctorant; E-mail: fidanmushtaqova@gmail.com</i>

БИОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГЕРБИЦИДАМИ

П.Ш. Мамедова, Э.Р. Бабаев, К.Р. Кахраманова, Ф.Г. Муштагова*

*Институт Химии Присадок имени академика А.М. Кулиева МНО Азербайджана,
Баку, Азербайджан*

Citation: Mammadova P.Sh., Babayev E.R., Kahramanova K.R., Mushtagova F.Q. Bioremediation of herbicide-contaminated soils. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 52-61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.50>

Резюме. Загрязнение почв, грунтовых и поверхностных вод гербицидами создает серьезные проблемы очистки. В настоящее время наиболее распространенным подходом является локализация, включающая дорогостоящий вывоз сильно загрязненных почв на свалки. Методы биоремедиации для обработки на месте необходимы в качестве альтернативных и/или дополнительных подходов для экономически эффективной и безотходной очистки. Микробы могут быть использованы для рекультивации почвы, загрязненной гербицидами, посредством процесса, называемого биоремедиацией, в ходе которого микроорганизмы разлагают или преобразуют загрязняющие вещества в менее вредные. Этот процесс может происходить естественным образом или быть усилен путем добавления в почву определенных микроорганизмов или питательных веществ. У микроорганизмов, таких как бактерии и грибы, есть ферменты, способные разлагать гербициды на менее токсичные соединения. Они часто используют эти гербициды в качестве источника питания. Рекультивация может проводиться на месте (*in situ*) или путем удаления почвы для обработки (*ex situ*). На микробную ремедиацию оказывают влияние следующие факторы: микробная активность (тип и численность присутствующих микроорганизмов, а также их способность деградировать конкретный гербицид); условия окружающей среды (такие факторы, как температура, влажность, pH и доступность питательных веществ, могут влиять на рост и активность микроорганизмов), свойства гербицида (химическая структура и концентрация гербицида могут влиять на его биоразлагаемость); свойства почвы (тип почвы, содержание органического вещества и аэрация могут влиять на микробную активность и биодоступность гербицида).

Ключевые слова: биоремедиация, микробы, гербициды, биодоступность, биоразлагаемость, рекультивация.

<i>Мамедова Парвин Шамхал кызы</i>	<i>Доктор химических наук</i>
<i>Бабаев Эльбей Расим оглы</i>	<i>Кандидат химических наук</i>
<i>Кахраманова Кенуль Расим кызы</i>	<i>Докторант</i>
<i>Муштагова Фидан Галиб кызы</i>	<i>Докторант</i>

1. Введение

В сельскохозяйственной практике сорняки часто представляют серьезную угрозу урожайности, поэтому широко используются гербициды [1]. Регулярное применение гербицидов может привести к их накоплению в почве и при повышенной концентрации изменяет физико-химические свойства почв, состав микрофлоры и ее активность и, следовательно, урожайность культур. Однако микроорганизмы могут быть толерантными или резистентными (незначительно или совсем не подверженными воздействию) к гербицидам. Таким образом, в последнее время используются различные типы и стратегии биоремедиации почв, загрязненных гербицидами. В этом контексте ризосферные микробы могут метаболизировать гербициды (например, атразин) посредством реакций гидролиза, катализируемых ферментами, с образованием циануровой кислоты в качестве промежуточного продукта, которая затем гидролитически превращается в аммиак и углекислый газ. Гербициды на основе моно- и трихлорфеноксиацетата также катаболизируются микробами посредством различных ферментативных реакций. Рекультивация может проводиться на месте (*in situ*) или путем удаления почвы для обработки (*ex situ*). К методам *in situ* относятся:

1) Естественное ослабление: основано на существующем микробном сообществе в почве.

2) Биостимуляция: включает в себя добавление питательных веществ (например, удобрений или органических веществ) для стимуляции роста местных микроорганизмов.

3) Биоаугментация: включает в себя введение специфических, отобранных штаммов микроорганизмов с известной способностью к деградации гербицидов.

4) Биовентиляция и биобарботаж: внесение кислорода в почву для повышения микробной активности.

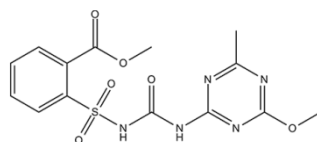
Методы *ex-situ*: предполагают удаление загрязненной почвы и ее обработку в изолированной среде, например, в биореакторе.

2. Анализ результатов исследований

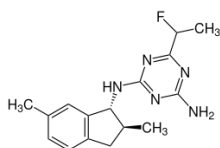
Нерациональное и поспешное развитие человеческого общества во всем мире привело к экологическому распаду [2]. Известно, что чрезмерное использование гербицидов/пестицидов опасно для окружающей среды, влияет на плодородие почв и может оказывать токсическое воздействие на организм. Микробная биоремедиация является наиболее изученным биотехнологическим процессом экологической рекультивации. При благоприятных условиях микробы используют гербициды/пестициды в качестве источника углерода, серы и электронов. Было показано, что токсическое действие хлорсодержащих гербицидов/пестицидов, полихлорированных дифенилов, полициклических ароматических углеводородов и органических фосфорсодержащих соединений нейтрализуется микробами, включая бактерии, актиномицеты и грибы.

Авторы работы [3] сообщают, что высокий спрос на гербициды обусловлен необходимостью увеличения производства сельскохозяйственных культур для удовлетворения мирового спроса. Тем не менее, применение гербицидов имеет негативные последствия, проявляющиеся в селекции устойчивых сорняков, образовании токсичных метаболитов в результате частичного разложения гербицидов, изменении микробных сообществ почвы и биогеохимических циклов, изменении питания растений и плодородия почвы, а также постоянном загрязнении окружающей среды. Некоторые гербициды повреждают нецелевые микроорганизмы посредством направленного вмешательства в метаболизм хозяина и механизмов окислительного стресса. По этим причинам необходимо разработать устойчивые и эффективные методы снижения этих экологических рисков. Прежде чем процесс разложения будет инициирован микробными ферментами и метаболическими путями, микроорганизмам необходимо выдержать окислительный стресс, вызываемый самими гербицидами. Этого можно достичь с помощью сложной системы ферментативных и неферментативных систем антиоксидантного стресса. Многие из этих систем реагирования не являются специфическими для

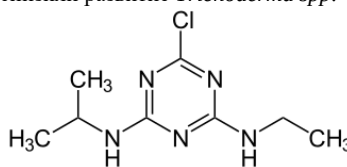
гербицидов, а активируются различными веществами. В совокупности эти неспецифические системы реагирования повышают потенциал выживания и приспособленности микроорганизмов. Исследования биodeградации и подходы к ремедиации основывались на индивидуально подобранных штаммах для эффективной ремедиации гербицидов в окружающей среде. Тем не менее, было показано, что микробные коммуникационные системы, которые модулируют социальные отношения и метаболические пути внутри структур биопленки среди микроорганизмов, сложны; поэтому использование изолированных штаммов для деградации ксенобиотиков необходимо расширять, используя подход, основанный на сообществе, с интеграцией путей биodeградации. В усилиях по биоремедиации могут использоваться технологии на основе «омики» для более глубокого понимания молекулярных комплексов бактериальных сообществ и достижения более эффективного устранения ксенобиотиков. Благодаря этим знаниям увеличивается возможность изменения микробных сообществ для повышения потенциала биоремедиации без возникновения других воздействий на окружающую среду, не ожидаемых более простыми подходами. Понимание динамики микробных сообществ как в свободноживущей микробиоте, так и в сложных сообществах и биопленках имеет первостепенное значение для достижения этих целей. Также крайне важно, чтобы неразвитые страны, являющиеся крупными производителями продуктов питания и потребителями гербицидов/пестицидов, имели доступ к этим технологиям для достижения устойчивого производства, не вызывая при этом последствий в виде неизвестных побочных эффектов.



метсульфурон-метил
Гербициды индазифлам и атразин снизили развитие *Trichoderma spp.*



индазифлам



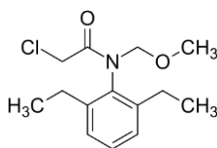
атразин

Целью работы [4] была оценка потенциала *Trichoderma spp.* в биоремедиации гербицидов и биостимуляции растений в почвах, загрязненных гербицидами. На первом этапе эксперимент следовал полностью рандомизированному дизайну в факторной схеме $4 \times 3 \times 4$ с пятью повторениями, четырьмя штаммами *Trichoderma spp.*, тремя гербицидами и четырьмя дозами гербицидов. Индекс скорости роста

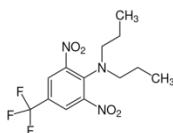
мицелия (MGSI) *Trichoderma spp.* был получен путем выращивания его в чашке Петри с PDA, связанным с различными дозами гербицидов, и оценивался каждые 24 часа в течение 10 дней. Результаты указали на выбор *Trichoderma harzianum T1A* для продолжения эксперимента, поскольку он показал увеличение MGSI с гербицидом метсульфурон-метил.

На втором этапе оценивали огурцы, выращиваемые по схеме, соответствующей трем дозам гербицида метсульфурон-метил, а также с применением и без применения *T. harzianum T1A* в шести горшках с двумя растениями в каждом, всего 12 растений/повторностей на обработку. Параметры хлорофилла а, хлорофилла b, общий индекс хлорофилла, высота растений, фитотоксичность, индекс листовой поверхности, сухая масса надземной части, длина корней и сухая масса корней оценивались у растений огурцов. Применение гербицида вызвало фитотоксичность у растений огурцов и снизило все параметры развития, оцениваемые в первой обработке. Фитотоксический эффект все еще наблюдался во второй обработке, что привело к снижению сухой массы корней и побегов при использовании метсульфурон-метила. Результаты показали, что *T. harzianum T1A* оказал значительное положительное влияние на развитие огурцов, увеличив высоту растений на 36%, индекс листовой поверхности на 71%, длину корней на 23%, сухую массу побегов на 54% и сухую массу корней на 21% в первой культуре при всех использованных дозах гербицида. Во второй культуре значительного влияния триходермы не наблюдалось. Следовательно, *T. harzianum T1A* способствует биостимуляции растений в почве, загрязненной метсульфурон-метилом, и может способствовать биоремедиации.

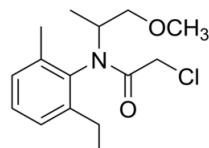
Были оценены комбинации земледелия и биостимуляции для рекультивации отходов гербицидов [5]. Различные количества почвы, загрязненной алахлором и трифлуралином (≥ 100 мг/кг каждого) и метолахлором и атразином (≥ 20 мг/кг каждого), были внесены на полевые участки, а осадок сточных вод или кукурузная мука были включены в выделенные участки.



метолахлор



алахлор

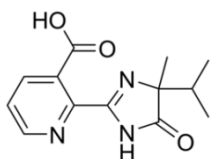


трифлуралин

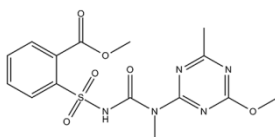
Участки также были обработаны свежими смесями для опрыскивания в количествах, аналогичных тем, которые вносились на загрязненную почву. Биоактивность почвы и рассеивание родительских гербицидов контролировались после обработок. В течение 100 дней активность почвенной дегидрогеназы была самой высокой на участках с внесенным

органическим материалом. За тот же период уровни алахлора снизились на 85–95% на измененных, обработанных загрязненной почве участках и на 75–85% на соответствующих немодифицированных участках. На свежееобработанных участках 95–100% исходной дозы алахлора рассеялось на обработанных участках, а 85–95% – на соответствующих необработанных участках. Уровень трифлуралина снизился на 70–80% на участках, обработанных кукурузной мукой, и на 60–75% на необработанных участках. Существенных различий между рассеянием трифлуралина при внесении в загрязненную почву или при свежем опрыскивании не наблюдалось.

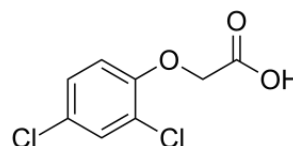
Биологическая рекультивация сельскохозяйственных почв, загрязненных нефтью, осложняется наличием остаточных количеств химических средств защиты растений, в частности, гербицидов, которые, как и нефть, негативно влияют на микробиом почвы и растения [6]. В данной работе исследованы пять штаммов бактерий родов *Pseudomonas* и *Acinetobacter*, которые проявили высокую степень биodeградации нефти (72–96%). Все штаммы проявили устойчивость к гербицидам на основе 2,4-Д, имазетапира и трибенурон-метила, способность к фиксации азота, мобилизации фосфата и образованию индолил-3-уксусной кислоты.



имазетапир



трибенурон-метил



2,4-D (2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота)

Присутствие поллютантов по-разному влияло на ростстимулирующие свойства бактерий. Наиболее перспективным штаммом *P. citronellolis* N2 было использование его отдельно и совместно с растениями овса и люпина для рекультивации почв от нефти, в том числе обработанных гербицидами нефтезагрязненных почв. Совместное загрязнение оказалось более токсичным для растений и почвенных микроорганизмов. Бактеризация стимулировала образование хлорофилла и подавляла синтез абсцизовой кислоты и малонового диальдегида в тканях растений. Совместное использование бактерий и растений овса наиболее эффективно снижало содержание углеводов в почве (в том числе в присутствии гербицидов). Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых методов биоремедиации почв с полихимическим загрязнением.

Исследования в области биоремедиации гербицид-загрязненных почв также сообщались в работах [7-25].

Таким образом, несмотря на свою эффективность в защите растений, гербициды могут вызывать широкий спектр возможных экологических последствий из-за их стойкости в экосистеме. Они могут попадать в почву при прямом распылении на поверхность, с ирригационным стоком или выделяться из отмершей растительности. Микробная деградация является основным механизмом, ответственным за трансформацию и детоксикацию большинства гербицидных соединений в почве. Микробная доступность гербицидов для биодеградации в почве в первую очередь определяется такими факторами, как адсорбция, десорбция, биодеградация и образование неизвлекаемых остатков. Изучение этих процессов может привести к лучшему пониманию эффективности и судьбы гербицида в окружающей среде [26].

3. Обсуждение результатов

В наших исследованиях [27-33] в лабораторных условиях изучена деструктивная активность некоторых углеводородокисляющих культур и их ассоциаций, выделенных из нефтезагрязненных почв, в отношении углеводородов нефти. Нефтедеструктивную активность исследуемых ассоциаций микроорганизмов оценивали по суммарному показателю, определяемому весовым методом убыли нефти и нефтепродуктов в жидкой среде. Фитотоксичность почв оценивалась биотестом с помощью семян пшеницы по соотношению числа проросших и не проросших семян, высоты проростков и длины корней. Проведен сопоставительный анализ результатов изучения особенностей изменения составов сырых нефтей и нефтяных загрязнений, подверженных микробиологической деструкции в жидкой минеральной среде и в почве. Использование метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье позволяет проанализировать особенности изменения химического состава загрязняющей почвы нефти под влиянием микробиологического окисления и предположить переход ее в более глубокую стадию деградации. Полученные данные свидетельствуют о том, что микробиологические процессы способствуют ароматизации и депарафинизации компонентов исследованной нефти. Используемые микроорганизмы также были предложены для биоремедиации почв, загрязненных пестицидами и гербицидами.

4. Заключение

В представленной работе осуществлен анализ результатов исследований в области биоремедиации почв, загрязненных пестицидами. Показано, что микроорганизмы (бактерии и грибковые патогены) обладают способностью к рекультивации почв, загрязненных гербицидами, пестицидами и другими токсичными химическими соединениями. Отмечены перспективы биоремедиации гербицид-загрязненных почв с применением микробных патогенов.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Institute of Chemistry of Additives of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan

Conflict of Interest: All authors declare that they have no conflict of interest.

ГЕРБИЦИДТЕРМЕН ЛАСТАҒАН ТОПЫРАҚТАРДЫҢ БИОРЕМЕДАЦИЯСЫ

П.Ш. Мамедова, Э.Р. Бабаев, К.Р. Кахраманова, Ф.Г. Муштагова*

Академик А.М. Кулиев атындағы Қоспалар химиясы институты, Баку, Әзірбайжан

Түйіндеме. Топырақтың, жер асты суларының және жер үсті суларының гербицидтермен ластануы тазалауда айтарлықтай қиындықтар туғызады. Қазіргі уақытта ең көп таралған әдіс - қатты ластанған топырақты қоқыс полигондарына қымбат тастауды талап ететін окшаулау. In-situ өңдеуге арналған биоремедияция әдістері үнемді, қалдықсыз тазалау үшін балама және/немесе қосымша тәсілдер ретінде қажет. Микробтарды гербицидтермен ластанған топырақты қалпына келтіру үшін биоремедияция деп аталатын процесс арқылы пайдалануға болады, онда микроорганизмдер ластаушы заттарды нашарлатады немесе зияндылығы азырақ түрлендіреді. Бұл процесс табиғи түрде болуы мүмкін немесе топыраққа белгілі бір микроорганизмдерді немесе коректік заттарды қосу арқылы күшейтілуі мүмкін. Бактериялар мен саңырауқұлақтар сияқты микроорганизмдерде гербицидтерді улылығы аз қосылыстарға ыдырататын ферменттер бар. Олар көбінесе бұл гербицидтерді тамақ көзі ретінде пайдаланады. Қалпына келтіруді in situ немесе өңдеу үшін топырақты алу арқылы (ex situ) жасауға болады. Микробтық ремедияцияға келесі факторлар әсер етеді: микробтық белсенділік (бар микроорганизмдердің түрі мен саны және олардың белгілі бір гербицидті ыдырату қабілеті); қоршаған орта жағдайлары (температура, ылғалдылық, рН және коректік заттардың қолжетімділігі сияқты факторлар микроорганизмдердің өсуі мен белсенділігіне әсер етуі мүмкін); гербицидтік қасиеттер (гербицидтің химиялық құрылымы мен концентрациясы оның биоыдырағыштығына әсер етуі мүмкін); топырақ қасиеттері (топырақ түрі, органикалық заттардың мөлшері және аэрация микробтардың белсенділігіне және гербицидтің биожетімділігіне әсер етуі мүмкін).

Түйін сөздер: биоремедияция, микробтар, гербицидтер, биожетімділік, биологиялық ыдырау, мелиорация.

<i>Мамедова Парвин Шамхал кызы</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
<i>Бабаев Эльбей Расим оглы</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Кахраманова Кеңұл Расим кызы</i>	<i>Докторант</i>
<i>Муштагова Фидан Галиб кызы</i>	<i>Докторант</i>

Список литературы:

1. Ahemad M., Khan S., Zaidi A., Ahamd Wani P. Remediation of herbicides contaminated soil using microbes. *Soils*. **2009**, 3, 142-149
2. Wani S., Tantray Y., Malik N., Irfan Dar M. Microbial Bioremediation of Pesticides/Herbicides in Soil Chapter in book – *Microbiota and Biofertilizers*. **2021**, 2, 21-60 DOI:10.1007/978-3-030-61010-4_2
3. Pileggi S.A., Sadowsky M.J. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities. *Heliyon*. **2020**, 6, N 12, 5767-5773 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05767>
4. Conte E.D., da Rosa E.J., Silvestrini G.R., Motta D.S. Can *Trichoderma* Spp. Contribute to the Bioremediation and Biostimulation of Plants in Soil Contaminated with Herbicides? *ACS Omega*. **2025**, 10, N 2, 2243-2252 <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09197>
5. Dzantor E.K., Felsot A.S., Beck M.J. Bioremediating herbicide-contaminated soils. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **1993**, 39, 621-320 DOI: 10.1007/BF02919023

6. Korshunova T., Kuzina E., Mukhamatdyarova S., Iskuzhina M. Effect of Herbicide-Resistant Oil-Degrading Bacteria on Plants in Soil Contaminated with Oil and Herbicides. *Plants*. **2024**, 13, N 24, 3560-3569 <https://doi.org/10.3390/plants13243560>
7. Ermakova I.T., Kiseleva N.I., Shyshkova T., Zharikov M. Bioremediation of glyphosate-contaminated soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **2010**, 88, N 2, 585-594 DOI: 10.1007/s00253-010-2775-0
8. Kaake R.H., Roberts D.J., Stevens T.O., Grawford R.L. Bioremediation of soils contaminated with the herbicide 2-sec-butyl-4,6-dinitrophenol (dinoseb) *Applied Environ. Microbiol.* **1992**, 58, N 5, 1683-1689 DOI: 10.1128/aem.58.5.1683-1689.1992
9. Sohrabi M., Parvizi A. Further Study on the Kinetics of Bioremediation of Soils Contaminated with the Herbicide 2,4-Dichlorophenoxy Acetic Acid. *Clean Soil Air Water*. **1997**, 35, N 2, 193-196 DOI:10.31026/j.eng.2014.08.07
10. Galon A., Lima A.M., Guimardes S., Belarimino I.G. Potential of plant species for bioremediation of soils applied with imidazoli herbicides. *Planta daninla*. **2014**, 32, N 4, 719-726 DOI:10.1590/S0100-83582014000400006
11. Nguyen L.A., Dang T.C., Koekkoek J., Braster M. Species and Metabolic Pathways Involved in Bioremediation of Vietnamese Soil From Bien Hoa Airbase Contaminated With Herbicides. *Front. Sustain.* **2021**, 3, 127-142 DOI:10.3389/frsc.2021.692018
12. Urbaniak M., Mierzejewska E. Biological Remediation of Phenoxy Herbicide-Contaminated Environments. *Chapter in book – Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches*, **2019**, 256 DOI:10.5772/intechopen.88256
13. Kanissery R.G., Sims G.K. Biostimulation for the Enhanced Degradation of Herbicides in Soil. *Applied and Environmental Soil Science*. **2011**, 15, 450-472 DOI:10.1155/2011/843450
14. Makut D., Bello A. Assessment of the Biodegradation of Herbicides by Bacteria Isolated from the Soil. *Asian Journal of Biotechnology and Bioresource Technology*. **2018**, 4, N 1, 1-6. DOI:10.9734/AJB2T/2018/42683
15. Wang J., Xinyu L., Xu L.I., Huanhuan W. Dynamic changes in microbial communities during the bioremediation of herbicide (chlorimuron-ethyl and atrazine) contaminated soils by combined degrading bacteria. *PLOS One*. **2018**, N 1, 1371-1378 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194753>
16. Hernandez M., Morgante V., Flores C., Villalobos P. Modern approaches for the study of S-triazine herbicide bioremediation in agricultural. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2008**, 8, N 2, 19-30 DOI:10.4067/S0718-27912008000200004
17. Arotiowa O., Ajani A.O., Aremu M.O., Agarry S.E. Bioremediation of Atrazine Herbicide Contaminated Soil Using Different Bioremediation Strategies. *J. Applied Sci. Environm. Management*. **2019**, 23, N 1, 99-109 DOI:10.4314/jasem.v23i1.16
18. Mustafa Y.A., Abdul-Hameed H., Razak H.A. Bioremediation of Soils Contaminated with 2,4-D Herbicide using bioslurry reactor. *Journal of Engineering*. **2014**, 20, N 8, 109-128 DOI:10.31026/j.eng.2014.08.07
19. Loring N. Bioremediation Treatability Studies for Soils Containing Herbicides, Chemicals, and Petroleum Products. *Environmental Sciences*. **2018**, N 4, 2-44 DOI 10.5703/1288284313154
20. Harris R.F. Bioremediation of Herbicide Contaminated Soil and Water. *University of Wisconsin--Madison. Water Resources Center*. **2018**, 28. DOI:10.4038/jas.v17i1.9609
21. Giri B.Sh., Geed S., Vikrant K., Sang S.L. Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment. *Environ. Eng. Res.* **2021**, 26, N 6, 446-470 DOI:10.4491/eer.2020.446
22. Hussain S., Siddique T., Arshad M., Saleem M. Bioremediation and Phytoremediation of Pesticides: Recent Advances. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. **2009**, 39, N 10, 843-907 <https://doi.org/10.1080/10643380801910090>
23. Erguven G.O., Yildirim N. Microbial Bioremediation of pesticides from contaminated environments. *III-rd International Agricultural, Biological & Life Science Conference*, Edirne, Turkey. 1-3 September, **2021**, 17-20
24. Erguven G.O. Comparison of some soil fungi in bioremediation of herbicide acetochlor under agitated culture media. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **2018**, 100, 570-575 DOI:10.1007/s00128-018-2280-1
25. Erguven G.O., Nuhoglu Y. Bioremediation of fluzifop-p-butyl herbicide by some soil bacteria isolated from various regions of Turkey in an artificial agricultural field. *Environment Protection Engineering*. **2020**, 46, N 3, 211-218 DOI:10.37190/epe200301

26. Kanissery R., Gairhe B., McAvoy C., Sims G. Herbicide Bioavailability Determinant Processes in the Soil. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*. **2018**, N 1, 458-461 DOI:10.4172/2155-6199.1000458
27. Бабаев Э.Р. Микробиологическая деструкция нефти в почвах Апшеронского полуострова. *Территория Нефтегаз*. **2017**, 11, 64-76
28. Mamedova P.Sh., Babayev E.R., Sultanova S.A., Kahramanova K.R., Yagubova A.V. Evalution of microorganism numbers in samples of petroleum contaminated soils from territories of Apsheron region. *Экоэнергетика*. **2007**, 2, 32-33.
29. Мамедова П.Ш., Кахраманова К.Р., Бабаев Э.Р., Алиева Х.Ш. Выделение активных углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязненных почв Сураханского месторождения. *Азербайджанский химический журнал*. **2008**, 3, 59-62
30. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Анализ активности отдельных штаммов-деструкторов нефтепродуктов и их ассоциаций для очистки нефтезагрязненных почв. *Процессы нефтехимии и нефтепереработки*. **2008**, 3-4(35-36), 229- 231.
31. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Кулиева Д.М. Выбор оптимальных питательных сред и условий культивирования для активного роста микроорганизмов-деструкторов нефти. *Процессы нефтехимии и нефтепереработки*. **2008**, 3-4(35-36), 177- 181.
32. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э. Преобразование нефти в процессе микробиологической деградации в почве. *Бакирский химический журнал*. **2009**, 6, № 3, 80-85.
33. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э., Мамедова П.Ш., Кулиева Д.М., Велиева Ф.М. Оптимизация состава питательных сред для нефтеокисляющих дрожжевых культур рода *Candida* *Нефтепереработка и нефтехимия*. **2010**, 11, 46-51.

CLINICAL EFFICACY OF DOSAGE FORMS IN PATIENTS WITH TUBERCULOSIS AND DIABETES: A COMPARATIVE REVIEW

A.B. Uzakova^{*1}, A. Yerlanuly¹, E.M. Ergalieva², K.A. Kadirbekov³

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

²Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan

³A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: a.uzakova@abaiuniversity.edu.kz

Abstract. *Introduction.* Tuberculosis (TB) and diabetes mellitus (DM) are increasingly recognized as a clinically and epidemiologically significant comorbidity that complicates treatment strategies and worsens clinical outcomes. DM increases the risk of developing active TB and negatively affects treatment response and prognosis. *The purpose of this work* is to provide a comparative analysis of the clinical efficacy and bioavailability of different antituberculosis dosage forms – tablets, syrups, and injections – used in patients with TB and DM comorbidity. *Results and discussion.* The literature review demonstrated that the pharmacokinetic properties of each dosage form and patient adherence significantly influence treatment effectiveness. Tablet forms are widely used and convenient, but their bioavailability may be reduced in patients with gastrointestinal complications associated with DM. Syrup formulations are suitable for patients with swallowing difficulties and for children, offering good bioavailability, though their storage stability is lower. Injectable forms provide a rapid therapeutic effect but are less practical for long-term treatment because of the need for medical supervision and potential discomfort. Recent international guidelines emphasize short, fully oral treatment regimens and patient-centered approaches. However, there remains a lack of targeted pharmacokinetic studies focusing on TB–DM populations. *Conclusion.* Different dosage forms used in TB treatment demonstrate distinct pharmacokinetic profiles and clinical effectiveness, which must be considered in the management of TB–DM comorbidity. Current international recommendations prioritize short oral regimens, but further research is needed to optimize drug formulations and improve treatment outcomes in this vulnerable patient population.

Keywords: tuberculosis, diabetes mellitus, dosage forms, bioavailability, tablets, syrups, injections, fixed-dose combinations, pharmacokinetics.

Uzakova Assem Bakitzhanovna	PhD; E-mail: a7_uzakova@mail.ru
------------------------------------	---

Yerlanuly Azamat	Master of Natural Sciences; E-mail: azaraze8575@mail.ru
-------------------------	--

Ergalieva Elmira Murzabekovna	PhD; E-mail: erg_el@mail.ru
--------------------------------------	---

Kadirbekov Kairat Adyrbekovich	Doctor of Chemical Sciences, Professor; E-mail: kkairati@mail.ru
---------------------------------------	--

Citation: Uzakova A.B., Yerlanuly A., Ergalieva E.M., Kadirbekov K.K. Clinical Efficacy Of Dosage Forms In Patients With Tuberculosis And Diabetes: A Comparative Review. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 62-77. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.51>

ТУБЕРКУЛЁЗ ЖӘНЕ ҚАНТ ДИАБЕТІ БАР НАУҚАСТАРДА ДӘРІЛІК ФОРМАЛАРДЫҢ КЛИНИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІ: САЛЫСТЫРМАЛЫ ШОЛУ

*А.Б. Узакова*¹, А. Ерланұлы¹, Э.М. Ергалиева², К.А. Кадирбеков³*

¹*Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан*

²*А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай, Қазақстан*

³*Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан*

Түйіндемесі. *Кіріспе.* Туберкулёз (ТБ) бен қант диабеті (ҚД) клиникалық және эпидемиологиялық тұрғыдан маңызды қосарланған ауру ретінде жиі қарастырылып жүр. Мұндай коморбидтілік емдеу стратегияларын қиындатып, клиникалық нәтижелердің нашарлауына әкеледі. ҚД белсенді ТБ-ның даму қаупін арттырып, емге жауап пен ауру болжамына теріс әсер етеді. Осы жұмыстың мақсаты – ТБ мен ҚД қатар кездесетін науқастарда қолданылатын әртүрлі дәрілік түрлердің (таблеткалар, сироптар және инъекциялар) клиникалық тиімділігі мен биожетімділігін салыстырмалы талдау болып табылады. *Нәтижелер мен талқылау.* Әдебиеттерге жүргізілген шолу әрбір дәрілік түрдің фармакокинетикалық қасиеттері мен науқастың емді қабылдау белсенділігі емнің тиімділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Таблеткалар кеңінен қолданылады және қолдануға ыңғайлы болғанымен, асқазан-ішек жолдарының ҚД-мен байланысты асқынулары бар науқастарда олардың биожетімділігі төмендеуі мүмкін. Сироптар жұтыну қиындығы бар науқастар мен балалар үшін қолайлы, биожетімділігі жақсы, бірақ сақтау тұрақтылығы төмен. Инъекциялық дәрілік түрлер тез терапиялық әсер береді, бірақ ұзақ мерзімді қолдануға ыңғайсыз, себебі медициналық бақылауды қажет етеді және қолайсыздықтар туғызуы мүмкін. Қазіргі халықаралық ұсынымдар қысқа мерзімді, толық пероральды емдеу режимдері мен пациентке бағдарланған тәсілдерді басымдыққа қояды. Дегенмен, ТБ мен ҚД бір уақытта кездесетін науқастар тобына арналған фармакокинетикалық зерттеулердің жеткіліксіздігі байқалады. *Қорытынды.* Туберкулёзді емдеуде қолданылатын дәрілік түрлердің фармакокинетикалық профильдері мен клиникалық тиімділігі әртүрлі, бұл ТБ мен ҚД бар науқастарды емдеу кезінде ескерілуі тиіс. Қазіргі халықаралық ұсынымдар қысқа мерзімді пероральды емдеу режимдерін ұсынады, алайда осы осал топтағы науқастар үшін дәрілік түрлерді оңтайландыру және ем нәтижелерін жақсарту мақсатында қосымша зерттеулер жүргізу қажет.

Түйін сөздер: туберкулёз, қант диабеті, дәрілік түрлер, биожетімділік, таблеткалар, сироптар, инъекциялар, бекітілген доза комбинациялары, фармакокинетика.

<i>Узакова Асем Бакитжановна</i>	<i>PhD</i>
<i>Ерланұлы Азамат</i>	<i>Жаратылыстану ғылымдарының магистрі</i>
<i>Ергалиева Эльмира Мурзабаевна</i>	<i>PhD</i>
<i>Кадирбеков Кайрат Адырбекович</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор</i>

1. Кіріспе

Туберкулёз (ТБ) қазіргі таңда да жаһандық денсаулық сақтау жүйесі үшін маңызды жұқпалы ауру болып қала береді. ДДҰ-ның 2024 жылғы есебінде 2023 жылы әлем бойынша 10.8 миллион адам ТБ-мен ауырғаны және 1,25 миллион адамның осы аурудан көз жұмғаны көрсетілген [1]. Жалпы сырқаттанушылықтың баяу төмендеуіне қарамастан, дәріге төзімді ТБ формалары әлем елдері үшін өзекті қауіп болып отыр [2]. Қазақстанда да соңғы он жылда ТБ көрсеткіштері төмендегенімен, аймақтар арасындағы теңсіздік және көп дәріге төзімді штаммдардың жоғары үлесі эпидемиологиялық жағдайдың тұрақсыз екенін білдіреді [3].

Қант диабеті (ҚД) де жаһандық денсаулық сақтаудың негізгі сын-кәтерлерінің бірі. 2021 жылы әлемде 537 миллионнан астам адам ҚД-мен

өмір сүрген, ал 2045 жылға қарай бұл көрсеткіш 783 миллионға жетуі мүмкін [4]. Жүргізілген жүйелі шолулар мен метаанализдер ҚД бар адамдарда ТБ даму қаупі 2–3 есе жоғары екенін дәлелдейді [5–7]. Қосарланған ТБ–ҚД жағдайында ауру ауырлау өтеді, емдеу ұзаққа созылады және рецидив жиілігі артады [8]. Аймақтық деректер Қазақстан мен Моңғолияда ТБ көрсеткіштері әлі де жоғары екенін көрсетсе [9], COVID-19 індеті бұл үрдіске қосымша теріс ықпал еткен [10].

Туберкулёзді емдеуде қолданылатын дәрілік формалардың (таблетка, сироп, инъекция) фармакокинетикасы, биожетімділігі және пациенттің емге бейілділігі айтарлықтай ерекшеленеді. Бұл айырмашылықтар, әсіресе ҚД бар пациенттерде, клиникалық нәтижелерге тікелей әсер етеді. Сондықтан қосарланған патологиясы бар науқастарда ең қолайлы дәрілік форманы таңдау клиникалық практикадағы маңызды және шешімін қажет ететін мәселе болып табылады.

Осы зерттеудің мақсаты – туберкулёз және қант диабеті бар науқастарда қолданылатын әртүрлі дәрілік формалардың (таблетка, сироп, инъекция) клиникалық тиімділігін, биожетімділігін және емге бейілділікке ықпалын салыстырмалы түрде талдау.

2. Талқылаулар

Туберкулёз эпидемиологиясы. Туберкулёз (ТБ) – адамзат тарихындағы ең көне әрі әлі күнге дейін жаһандық деңгейде өзекті болып отырған жұқпалы аурулардың бірі. Қазақстандағы эпидемиологиялық модельдеу әдістерін (SARIMA және SIR) қолданған зерттеулер соңғы жылдары аурушандықтың төмендеу үрдісін көрсеткенімен, маусымдық өзгерістер мен әлеуметтік факторлардың ықпалы айтарлықтай екендігін дәлелдеді [11]. Генетикалық зерттеулер елімізде туберкулёздің белгілі бір популяцияларға бейімделген штаммдары бар екенін анықтады [12], ал иммуногенетикалық факторлар, соның ішінде D дәрумені тапшылығы мен VDR/TLR гендеріндегі полиморфизмдер, ауруға шалдығу қаупін күшейтетіні көрсетілді [13].

Жаһандық деңгейдегі талдаулар соңғы жиырма жылда туберкулёздің сырқаттанушылық көрсеткіштері баяу төмендегенін, алайда аймақтық айырмашылықтар әлі де сақталып отырғанын айғақтайды [14]. Жас ерекшеліктері тұрғысынан алғанда, балалар мен жасөспірімдер арасында аурушандықтың төмендеуі қарқынды жүрсе, ересек жастағы топтарда көрсеткіштердің жоғары деңгейде қалуы назар аудартады [15]. Емделмеген өкпе туберкулёзінде аурудың табиғи ағымы өте қолайсыз: жүйелі шолулар деректері бойынша, мұндай науқастардың шамамен 70%-ы бірнеше жыл ішінде қайтыс болады [16]. Сондықтан Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының 2050 жылға дейінгі стратегиясы туберкулёзді толық жоюды көздеп, ерте диагностика мен тиімді емдеуді кеңінен қолдануды негізгі басымдық ретінде белгілейді [17].

Латентті туберкулёз инфекциясы (ЛТБИ) да эпидемиологиялық тұрғыдан үлкен маңызға ие. Ғаламдық модельдік есептеулер бойынша, әлем халқының үштен біріне дейінде ЛТБИ бар, ал ол кез келген уақытта белсенді формаға айналуы ықтимал [18]. Бұл жағдай Қазақстан сияқты эндемиялық аймақтар үшін қосымша қауіп факторы болып отыр. Туберкулёздің қант диабетімен (ҚД) байланысы да кеңінен зерттелген. Жүйелі шолуларға сәйкес, ҚД бар науқастардың ТБ-мен ауру қаупі 2–3 есе жоғары [19]. Биологиялық тұрғыда бұл байланыс диабетке тән иммундық тапшылықпен түсіндіріледі: гипергликемия макрофагтардың микобактерияға қарсы қорғаныс қабілетін әлсіретіп, инфекцияға бейімділікті күшейтеді [20]. ҚД-ның жаһандық өсуі ТБ-ға қарсы күрес стратегияларына қосымша қиындық туғызады [21]. Осыған байланысты, сарапшылар туберкулёз бен қант диабетінің қосарланған эпидемиясын дербес ғылыми әрі клиникалық мәселе ретінде қарастыру қажеттігін атап өтеді [22–24]. Қазіргі шолуларда бұл байланыстың тек эпидемиологиялық емес, патофизиологиялық деңгейде де негізделгені көрсетілді: гипергликемия микробқа қарсы иммундық жауапты әлсіретіп, аурудың ағымын ауырлатады және рецидив пен өлім-жітім қаупін арттырады [25]. ҚД бар науқастарды емдеуде қолданылатын туберкулезге қарсы препараттардың фармакокинетикасы мен биожетімділігінде айырмашылықтар болуы мүмкін. Когорттық зерттеулерде гликемиялық бақылаудың әлсіреуі ТБ даму қаупін екі есеге дейін арттыратыны дәлелденді [26], ал жүйелі шолулар диабеті бар науқастарда ем нәтижелерінің қолайсыздығын көрсетті [27]. Клиникалық зерттеулерде мұндай науқастарда өкпе зақымдануының көлемі кеңірек және ауру ағымы ауырлау болатындығы анықталды [28, 29]. Эпидемиологиялық деректер диабет пен ТБ-ның «қосарланған індет» ретінде жаһандық денсаулық сақтау жүйелеріне қосымша жүктеме түсіретінін айқындайды [30, 31]. Метаанализдерге сәйкес, белсенді ТБ-мен ауыратындардың шамамен 16%-ында қатарынан қант диабеті бар [32], бұл өз кезегінде ТБ науқастарында ҚД скринингін енгізудің маңыздылығын арттырады.

ДДҰ мен Халықаралық туберкулёз одағының бірлескен құрылымдық құжатында ҚД және ТБ бар науқастарды интеграцияланған түрде басқару қажеттігі нақты ұсынылады [33]. ДДҰ-ның соңғы клиникалық нұсқаулықтары (2022, 2025 жж.) да осы бағытты қолдайды [34, 35]. Сонымен қатар, балалар мен жасөспірімдерге арналған ыңғайлы дәрілік формаларға (дисперсиялық таблеткалар, сироптар) қатысты ДДҰ және UNICEF бастамалары қосарланған патология жағдайында емнің үздіксіздігін қамтамасыз етудің маңызын атап көрсетеді [36, 37]. Халықаралық ұйымдар (Stop TB Partnership, UNICEF) балаларға арналған дәрілік формалардың қолжетімділігін кеңейту бағытында да жұмыс жүргізіп келеді [38, 39]. Фармакокинетикалық тұрғыдан алғанда, туберкулезге қарсы препараттардың дәрілік формалары арасында биожетімділікте айырмашылық бар. Мысалы, рифампицин, изониазид және пиразинамидті

біріктірілген тұрақты комбинация түрінде қабылдау олардың жеке препараттарға қарағанда фармакокинетикалық профильдеріне аздаған өзгеріс енгізетіні көрсетілген [40]. Бұл деректер қант диабеті бар науқастардағы ем тиімділігін бағалауда және клиникалық тактиканы таңдауда ерекше маңызға ие.

Дәрілік формалар (таблетка, сироп, инъекция). Туберкулёзді емдеуде қолданылатын дәрілік формалардың ерекшеліктері клиникалық тиімділікке тікелей ықпал етеді. Қазіргі таңда ең көп қолданылатын таблеткалық және тұрақты комбинациялы дәрілік формалардың (fixed-dose combination, FDC) фармакокинетикасына қатысты зерттеулер әртүрлі нәтижелер көрсетуде. Мәселен, рифампицин, изониазид, этамбутол және пиразинамидтің FDC құрамындағы биожетімділігі жеке препараттарға қарағанда аздап өзгертетіні анықталған [41]. Бұл айырмашылық клиникалық нәтижелерге әсер етуі мүмкін болғандықтан, мұқият талдау талап етеді. Дәрілік формалардың фармакокинетикалық және клиникалық айырмашылықтары науқастардың емге бейімділігі мен нәтижелеріне елеулі әсер етеді. Төменде таблетка, сироп және инъекция түрлерінің негізгі сипаттамалары салыстырмалы түрде берілген (Кесте 1).

Кесте 1 – Туберкулезге қарсы дәрілік формалардың клиникалық, фармакотехнологиялық және қолдану ерекшеліктері бойынша салыстырмалы талдауы

Көрсеткіштер	Таблетка (пероральды қатты форма)	Сироп (пероральды сұйық форма)	Инъекция (парентералды)
Фармакотехнологиялық қасиеттері	Қатты форма; ерігеннен кейін ғана сіңеді	Бірден еріген күйде; дайын сұйық жүйе	Ерітінді/суспензия; тікелей жүйелік айналымға түседі
Сіңірілу жылдамдығы	Баяу немесе орташа; тағам, температура және гастропарез әсер етеді	Тұрақты және жылдам; GI транзиті тез	Өте жылдам; GI жүйесін айналып өтеді
Биожетімділік тенденциясы	Варибельді; тағам мен моторикаға тәуелді	Тұрақтырақ; асқазан моторикасына тәуелділігі аз	Жоғары және тұрақты; ауытқу минималды
Tmax тенденциясы	↑ (ұзарады); ҚД кезінде кешігеді	Орташа; таблеткаға қарағанда жылдамырақ	Минималды; жедел әсер береді
Cmax тенденциясы	↓ немесе variabelді; клиникалық тиімділікті төмендетуі мүмкін	Орташа–жоғары; біркелкі	Жоғары және тұрақты
AUC тенденциясы	↓; экспозиция төмендеуі мүмкін; variabelділік ↑	Орташа және біркелкі	Ең жоғары экспозиция; тұрақты
Қант диабеті жағдайындағы өзгешеліктер	Tmax ↑, Cmax ↓, AUC ↓; variabelділік ↑	Өзгеріс минималды	Өзгеріс жоқ (A1Ж жүйесіне тәуелсіз)

Көрсеткіштер	Таблетка (пероральды қатты форма)	Сироп (пероральды сұйық форма)	Инъекция (парентералды)
Емге бейілділік (adherence)	Жоғары; қабылдау ыңғайлы	Балалар/қарттарға қолайлы; жұту жеңіл	Төмендеу; инвазивті, ауырсыну болуы мүмкін
Клиникалық артықшылықтары	Қолдануға ыңғайлы, тұрақты режим	Дозалау икемді; жұту қиындығы бар топқа тиімді	Жедел әсер; ауыр және жедел жағдайларда тиімді
Шектеулері	Биожетімділіктің ауытқуы; тағам әсері	Кейбір препараттарда сақтау мерзімі шектеулі	Медициналық қызметкерді қажет етеді
Қолданылу жағдайлары	Стандартты күнделікті режимдер	Балалар, қарттар, жұту қиындығы бар пациенттер	Пероральды сіңірілу бұзылған немесе ауыр жағдайлар

Оңтүстік Африкада жүргізілген сапаны бақылау зерттеулері кейбір рифампицин бар FDC партияларында дозаланудың жеткіліксіз екенін көрсетті, бұл ем нәтижелерін төмендету қаупін тудыруы ықтимал [42]. Дегенмен, нақты клиникалық тәжірибеде FDC қолдану науқастардың емге бейілділігін арттырып, дәрі қабылдау тәртібін жеңілдететінін дәлелдейтін деректер жеткілікті [43].

Соңғы онжылдықтарда дәріге төзімді туберкулёзді емдеуге бағытталған жаңа буын препараттар да әртүрлі дәрілік формаларда қолданысқа енгізілуде. Мысалы, бедаквилин [44, 45], деламанид [46] және претоманид [47, 48] Еуропалық дәрі агенттігі (EMA) және АҚШ FDA тарапынан мақұлданып, таблетка түрінде ұсынылды. Бұл препараттар қысқартылған, бірақ жоғары тиімділігі бар режимдердің құрамына енгізіліп, дәріге төзімді ТБ терапиясында ерекше орынға ие болды. Инъекциялық емес баламалардың артықшылықтарымен қатар, кейбір антибиотиктердің әртүрлі дәрілік формалардағы фармакокинетикасы зерттелген.

Линезолидке қатысты зерттеулерде энтеральды коректендіру жағдайында да оның сіңірілуі тұрақты екені анықталды. Алайда биожетімділіктегі айырмашылықтардың клиникалық маңызы бар екендігі хабарланды [49–51]. Бұл жағдай полирезистентті және кеңейтілген дәріге төзімді туберкулёзді емдеуде маңызды фактор болып табылады. Балаларға арналған дәрілік формаларға қатысты да өзекті мәселелер бар. Африкалық балаларда жүргізілген pooled-анализ этамбутолдың фармакокинетикасы салмаққа тәуелді екенін және тиімді дозалау стратегиясын қажет ететінін көрсетті [52]. Бұл деректер балалардағы терапияны жекелендірудің маңызын дәлелдейді. Алдын алу терапиясы саласында да жаңа бағыттар қалыптасып отыр. Азаматтық қозғалыстар мен пациенттік ұйымдар рифапентин негізіндегі қысқа профилактикалық курстарды (3HP, 1HP) қолдауды кеңінен насихаттауда [53]. Клиникалық тұрғыдан, моксифлоксацинге негізделген төрт айлық режимдер (REMOxTB) [54],

сондай-ақ жоғары дозалы рифапентин мен моксифлоксацинді біріктірген (RIFAQUIN) [55] зерттеулерінде тиімділік пен қауіпсіздік расталды. Жалпы алғанда, таблетка, сироп және инъекция түріндегі дәрілік формалардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар. Қазіргі тәжірибеде FDC және жаңа буын таблеткалық препараттар науқастардың емге бейілділігін арттыруға мүмкіндік береді, ал кейбір жағдайларда инъекциялық немесе балаларға арналған арнайы формалардың қолданылуы терапияның үздіксіздігі мен тиімділігін қамтамасыз етеді.

Клиникалық тиімділікті салыстыру. Туберкулёзді емдеудің тиімділігін арттыру мақсатында соңғы онжылдықтарда қысқартылған және инновациялық терапиялық режимдер кеңінен зерттеліп келеді. Гатифлоксацин негізінде ұсынылған төрт айлық режим (OFLOTUB) классикалық алты айлық стандартты режиммен салыстырылған клиникалық сынақтарда тиімділік тұрғысынан ұқсас нәтиже көрсеткенімен, қауіпсіздік мәселелері бойынша шектеулер анықталды [56].

Латентті туберкулёз инфекциясын (ЛТБИ) емдеуде қысқартылған профилактикалық режимдер ерекше назарға ие болды. Үш айлық рифапентин мен изониазид комбинациясы (3HP) ұзақ мерзімді изониазид монотерапиясымен салыстырғанда тиімді әрі қауіпсіз екені дәлелденді [57]. Сонымен қатар, ВИЧ-инфекциясы бар науқастарда жүргізілген бір айлық қысқа курс (1HP) тиімді профилактикалық балама ретінде ұсынылды [58].

Дәріге сезімтал ТБ-ны емдеуде жоғары дозалы рифампицин, моксифлоксацин және SQ109 қамтылған режимдер (RapACEA MAMS-TB) қысқа мерзім ішінде жоғары тиімділігін көрсетті [59]. Сондай-ақ, төрт айлық рифапентин немесе рифампицин режимдері ересектердегі латентті ТБ-ның емдеу нәтижелерін айтарлықтай жақсартқаны белгілі болды [60]. Дәріге төзімді туберкулёзді (MDR-TB) емдеу саласында да жаңа тәсілдер өзін тиімділігін көрсетті. Мысалы, BPaL режимі (бедаквилин, претоманид және линезолид комбинациясы) жоғары дәрежеде дәріге төзімді өкпе туберкулезінде клиникалық тұрғыдан айқын пайда берген [61]. Бұл нәтижелер кейінірек ZeNix клиникалық сынағында расталды, онда линезолид дозасын азайту арқылы жанама әсерлер төмендетілгенімен, тиімділік сақталған [62]. Сонымен қатар, Африка аймағында жүргізілген зерттеулер қысқа мерзімді (9-12 ай) режимдердің MDR-TB емінде тиімді балама екенін көрсетті [63].

Классикалық тікелей бақыланатын терапия (Directly Observed Therapy, DOT) да өз тиімділігін дәлелдеді. Cochrane деректер базасында жарияланған жүйелі шолуларға сәйкес, бұл тәсіл науқастардың емді толық аяқтау ықтималдығын арттырады [64]. Рифапентинді ЛТБИ емінде қолдану бойынша жүргізілген зерттеулер оның клиникалық әлеуетін қосымша негіздеп берді [65].

Жаңа клиникалық сынақтардың дизайны да терапиялық режимдерді бағалауда маңызды рөлге ие болып отыр. Қысқартылған режимдерді бағалау барысында әдістемелік жаңашылдықтарды қолдану қажеттілігі туралы

пікірлер жиі айтылады [66]. Бұған мысал ретінде рифампицинге төзімді ТБ-ны қысқартылған режимдермен емдеу тәжірибелерін келтіруге болады, олар тиімді әрі қауіпсіз нұсқа ретінде ұсынылуда [67]. Сонымен қатар, тиімділікті арттырумен қатар қауіпсіздік мәселелері де назардан тыс қалмауы тиіс. Мәселен, амикацин мен канамицин сияқты аминогликозидтерді ұзақ қолдану есту қабілетінің жоғалу қаупін арттыратыны метаанализдерде көрсетілген [68].

Дәрілік формалардың тиімділігіне байланысты жүргізілген жүйелі шолулар тұрақты комбинациялы препараттардың (FDC) монотерапияға қарағанда науқастардың емге бейілділігін жақсартып, дәрі қабылдау тәртібін жеңілдететінін дәлелдеді [69]. Ал ДДҰ-ның соңғы нұсқаулықтары профилактикалық емнің қысқа курстарын қолдануды ұсынады, бұл клиникалық тәжірибеде тиімділікті арттыруға қосымша мүмкіндік береді [70].

Әлемдік клиникалық нұсқаулар мен шолулар. Туберкулёзді (ТБ) емдеуде халықаралық ұйымдар мен ұлттық агенттіктердің ұсынымдары клиникалық тәжірибенің негізгі негізін құрайды. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ) 2022 жылғы жаңартылған құжатында дәріге төзімді ТБ-ны емдеу үшін қысқартылған, толық пероральды режимдерді енгізуді ұсынды [71]. Ал 2024 жылғы жедел ақпараттық хабарламасында бедаквилин, делаганид және претоманид сияқты жаңа буын препараттарын қолдану аясын кеңейту қажеттігі баса айтылды [72]. Ұлыбританиядағы Ұлттық денсаулық сақтау және күтім стандарттары институты (NICE) 2016 жылғы нұсқаулығын қайта қарап, 2024 жылғы шолуларында дәлелді медициналық деректерге негізделген диагностикалық және терапиялық тәсілдерді күшейтті [73]. Сонымен қатар, 2020 жылғы ДДҰ ұсынымдары дәріге төзімді ТБ үшін қысқа мерзімді, толығымен пероральды режимдердің клиникалық тиімділігін растады [74]. Халықаралық әріптестік ұйымдар да дәрілердің қолжетімділігіне басымдық беруде. Stop TB Partnership және Global Drug Facility бірлескен бағдарламалық ұсынымдар мен дәрілік каталогты жариялап, әсіресе төмен және орташа табысты елдер үшін терапияны ұйымдастыруда маңызды құрал ұсынды [75]. Жаңа дәрілерді қолдану барысында қауіпсіздік пен жанама әсерлерді бағалау да маңызды орын алуда. Жүргізілген жүйелі шолулар мен метаанализдер бедаквилин, делаганид және претоманид қабылдаған науқастарда жүрек ырғағының бұзылыстары, атап айтқанда QT аралығының ұзаруы жиі кездесетінін көрсетті [76, 77].

Латентті ТБ-ны емдеуге қатысты 2014 жылы жүргізілген желілік метаанализ қысқа профилактикалық режимдердің тиімді әрі қолайлы екенін дәлелдеді [78]. Дәріге сезімтал ТБ еміндегі қысқа курстардың да жоғары нәтижелер беретіні 2021 жылғы шолуларда расталды [79]. Ал соңғы зерттеулер BPaL және BPaLM режимдерінің тиімділігі мен салыстырмалы қауіпсіздігін көрсетіп отыр [80]. Латентті инфекцияны емдеуде төрт айлық рифампин курсы тоғыз айлық изониазид монотерапиясына клиникалық

тұрғыдан балама ретінде ұсынылды [81]. АҚШ-тағы CDC және NTCA тарапынан 2020 жылы жарияланған нұсқаулықта дәлелге негізделген бірнеше қысқа режимдер ұсынылып, оларды қолдану тәжірибеге енгізілді [82]. Диагностика бағытында ДДҰ 2021–2023 жылдары қабылдаған консолидирленген нұсқаулығында молекулалық тестілер мен жедел диагностикалық әдістерді қолдану қажеттігі атап өтілді [83]. Дәріге төзімді ТБ-ны басқаруға арналған 2014 жылғы нұсқаулық пен оның жаңартылған нұсқалары клиникалық тәжірибеде әлі күнге дейін қолданылады [84]. Көптеген халықаралық кәсіби қауымдастықтар (ATS, CDC, ERS, IDSA) бірігіп 2019 жылы дәріге төзімді ТБ-ны емдеу бойынша ресми нұсқаулық жариялады. Бұл құжат жаңа препараттарды қолдану, терапия ұзақтығын қысқарту және қауіпсіздікті арттыру жөнінде нақты ұсынымдар береді [85].

Туберкулёз (ТБ) және қант диабеті (ҚД) арасындағы өзара байланыс қазіргі денсаулық сақтау жүйесінде тек медициналық тұрғыдан ғана емес, саяси және стратегиялық деңгейде де күрделі мәселе ретінде қарастырылады. Сарапшылардың пікірінше, ҚД бар науқастарды ТБ-ға қарсы алдын алу, ерте диагностика және тиімді еммен қамтамасыз ету – ұлттық бағдарламалар мен жаһандық денсаулық сақтау күн тәртібінің негізгі басымдықтарының бірі [86].

ДДҰ ұсынған *End TB Strategy* туберкулёзді толық жою мақсатында интеграцияланған тәсілдерді қолдануды талап етеді. Бұл стратегияға пациентке бағдарланған емдеу, заманауи молекулалық диагностика әдістерін кеңінен енгізу және ТБ-ны басқа созылмалы аурулармен бірге басқару кіреді [87]. Соңғы жылдары барлық пероральды режимдердің енгізілуі дәріге төзімді ТБ-ны емдеуде құрылымдық жеңілдіктер беріп, емдеу тиімділігі мен ұйымдастырушылық икемділікті арттырғаны атап өтілді [88]. ДДҰ-ның клиникалық нұсқаулықтары мен саясаттық құжаттары дәріге төзімді ТБ емінде қысқа мерзімді режимдердің артықшылықтарын, қауіпсіз әрі қолжетімді әдістерді қолданудың маңыздылығын нақтылайды [89–92]. Балалар мен жасөспірімдерге арналған 2022 жылғы нұсқаулықтар осы жас тобына бейімделген терапияны қамтамасыз етуге бағытталған, бұл педиатриялық ТБ-ны басқаруда жаңа кезеңнің бастамасы болды [93, 94].

Алдын алу шаралары да саясаттық деңгейде үлкен мәнге ие. ДДҰ-ның 2020 жылғы *латентті ТБ-ны басқару жөніндегі модулі* қысқа профилактикалық режимдердің тиімділігін ерекше атап көрсетіп, бұл тәсілді қосымша аурулары бар қауіпті топтарда қолдануды ұсынды [95].

Жаһандық метаанализдер мультидәріге төзімді ТБ (MDR-TB) емінің табысты болуы белгілі бір клиникалық және бағдарламалық факторларға тәуелді екенін көрсетті [96]. Жаңа буын дәрілердің бірі – линезолид – айқын тиімділігін дәлелдегенімен, миелосупрессия сияқты айтарлықтай жанама әсерлерімен ерекшеленеді [97]. Сонымен қатар, бедаквилин, деламаид және претоманидке қатысты жүргізілген жүйелі шолулар бұл препараттардың тиімділігін растаумен қатар, QT аралығының ұзаруы сияқты жүрекке байланысты қауіптерді мұқият бақылауды қажет ететінін

көрсетті [98, 99]. Жалпы алғанда, ТБ мен ҚД қосарланған патологиясын басқару мультидисциплинарлық тәсілді, халықаралық ұсынымдарды қатаң сақтауды және әрбір аймақтың эпидемиологиялық ерекшеліктерін ескеруді талап етеді. Бұл бағыттағы табысты тәжірибелер тек ұлттық деңгейдегі денсаулық сақтау жүйесіне ғана емес, сонымен қатар жаһандық *End TB Strategy* мақсаттарына жетуге де айтарлықтай үлес қосады.

3. Қорытынды

Туберкулёз (ТБ) және қант диабеті (ҚД) арасындағы өзара байланыс қазіргі клиникалық тәжірибеде ерекше назарды қажет ететін маңызды эпидемиологиялық мәселе болып отыр. ҚД бар науқастардың ТБ-ға шалдығу қаупінің жоғары болуы, ауру ағымының ауырлығы және ем нәтижелерінің қолайсыздығы бұл топты басқаруда жекелендірілген тәсілдің қажеттілігін арттырады. Әдеби шолу нәтижелері дәрілік формалардың (таблетка, сироп, инъекция) клиникалық және фармакокинетикалық тиімділігі айтарлықтай ерекшеленетінін көрсетеді. Таблеткалар қолдануға ыңғайлы болғанымен, ҚД бар науқастарда олардың биожетімділігі гастропарезге байланысты төмендеуі мүмкін. Сироп формалары жұту қиындығы бар топтарда тиімді, ал инъекциялық формалар әсердің жедел басталуымен ерекшеленгенімен, ұзақ қолдануда бейімділіктің төмендеуіне әкелуі мүмкін.

Фармакокинетикалық айырмашылықтар пероральды таблеткаларда Ттах ұзаруы, Стах төмендеуі және экспозицияның төмендеуі мүмкін екенін көрсетеді, бұл клиникалық тиімділіктің азаюына ықпал етуі ықтимал. Ал сироптарда сіңірілу тұрақтырақ, инъекциялық формалар ең жоғары және біркелкі экспозицияны қамтамасыз етеді. Сондықтан дәрілік формаларды таңдау кезінде науқастың физиологиялық жағдайы, қатар жүретін сырқаттары және терапиялық бейімділігі міндетті түрде ескерілуі тиіс.

Халықаралық ұсынымдар толық пероральды, қысқартылған және бейімделген режимдерді қолдануды қолдайды, алайда ТБ+ҚД популяциясына арналған арнайы зерттеулердің аздығы ғылыми олқылық ретінде байқалады. Болашақта фармакокинетика, дәрілік өзара әрекеттесулер және adherence-факторлар бағытында мақсатты зерттеулер жүргізу өзекті.

Қорытындылай келе, ТБ және ҚД қосарланған патологиясы бар науқастарды басқаруда келесі клиникалық және ұйымдастырушылық қадамдар маңызды:

Практикалық ұсыныстар:

- ҚД бар науқастарда пероральды таблеткалардың биожетімділігі төмендеуі мүмкін болғандықтан, дозаны жекелендіру және қажет жағдайда сироп немесе инъекциялық формаларды қолдану ұсынылады.

- Сироп формалары жұту қиындығы бар пациенттерге, балалар мен қарттарға клиникалық тұрғыдан қолайлы балама болып табылады.

- Инъекциялық формалар әсердің жедел басталуын қажет ететін немесе пероральды сіңірілу бұзылған жағдайларда тиімді.

- Терапевтік дәрі деңгейін бақылау (TDM) ТБ+ҚД популяциясында фармакокинетикалық вариабельділікті төмендетіп, ем тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

- FDC (fixed-dose combination) препараттарын қолдану бейімділікті жақсартады және ем режимін жеңілдетеді.

- Жаңа тиімді режимдер (ЗНР, ІНР, ВРaL және т.б.) күрделі клиникалық жағдайларда ем нәтижелерін жақсартуға мүмкіндік береді.

- Ұлттық ТБ бағдарламаларында ТБ+ҚД науқастарды жеке тәуекел тобы ретінде қарастырып, интеграцияланған скрининг пен мониторинг жүйесін енгізу ұсынылады.

Осындай кешенді және дәлелге негізделген тәсілдер ДДҰ-ның *End TB Strategy* мақсаттарына қол жеткізуге және ТБ мен ҚД қиылысқан эпидемиясының аймақтық және жаһандық ауыртпалығын азайтуға бағытталған тиімді шешімдер ұсынады.

Қаржыландыру: Авторлар «О-ароил-β-(пиперидин-1-ил)пропиоамидоксим гидрохлоридінің дәрілік формаларын алу және оның фармакологиялық еру әсерін анықтау» тақырыбы бойынша жоба №05-04/250 бұйрығымен 2025 жылдың 03 сәуірінде грант алғаны үшін Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университетіне алғыс білдіреді.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада келтірілген деректерде авторлар арасында мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

КЛИНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ У БОЛЬНЫХ ТУБЕРКУЛЕЗОМ И САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР

*А.Б. Узакова^{*1}, А. Ерланұлы¹, Э.М. Ергалиева², К.А. Кадирбеков³*

¹Казахский Национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

²Костанайский региональный университет имени А.Байтұрсынова, Костанай, Казахстан

³Институт химических наук имени А.Б. Бектурова, Алматы, Казахстан

Резюме. Введение. Туберкулёз (ТБ) и сахарный диабет (СД) всё чаще рассматриваются как клинически и эпидемиологически значимая коморбидность, которая осложняет стратегии лечения и ухудшает клинические исходы. СД повышает риск развития активного ТБ и отрицательно влияет на ответ на лечение и прогноз заболевания. *Цель данной работы* – провести сравнительный анализ клинической эффективности и биодоступности различных противотуберкулёзных лекарственных форм – таблеток, сиропов и инъекций – применяемых у пациентов с сочетанием ТБ и СД. *Результаты и обсуждение.* Обзор литературы показал, что фармакокинетические свойства каждой лекарственной формы, а также приверженность пациентов к лечению существенно влияют на эффективность терапии. Таблетированные формы широко применяются и удобны в использовании, однако их биодоступность может снижаться у пациентов с желудочно-кишечными осложнениями, связанными с СД. Сиро́пы подходят для пациентов с затруднением глотания и для детей, обеспечивая хорошую биодоступность, хотя их стабильность при хранении ниже. Инъекционные формы обеспечивают быстрое терапевтическое действие, но менее удобны для длительного лечения из-за необходимости медицинского наблюдения и возможного дискомфорта. В современных международных рекомендациях делается акцент на коротких, полностью пероральных режимах терапии и на пациент-ориентированных подходах. Однако по-прежнему отмечается недостаток фармакокинетических исследований, посвящённых популяциям пациентов с сочетанием ТБ и СД. *Заключение.* Различные лекарственные формы, используемые при лечении ТБ, обладают различными фармакокинетическими профилями и клинической эффективностью,

что необходимо учитывать при ведении пациентов с сочетанием ТБ и СД. Современные международные рекомендации отдают приоритет коротким пероральным схемам лечения, однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию лекарственных форм и улучшение результатов лечения у этой уязвимой категории пациентов.

Ключевые слова: туберкулёз, сахарный диабет, лекарственные формы, биодоступность, таблетки, сиропы, инъекции, фиксированные комбинации доз, фармакокинетика.

<i>Узакова Асем Бакитжановна</i>	<i>PhD</i>
<i>Ерланұлы Азамат</i>	<i>Магистр естественных наук</i>
<i>Ергалиева Эльмира Мурзабаевна</i>	<i>PhD</i>
<i>Кадирбеков Кайрат Адырбекович</i>	<i>Доктор химических наук, профессор</i>

References

1. World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2024. Geneva: WHO; **2024**.
2. Estaji F., Goletti D., Meintjes G. et al. Insights from the 2024 WHO Global TB Report. *Zoonoses*, **2025**, 5(1): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.zoon.2025.100123>
3. Sakko Y., Akhmetova Z., Zhunussov Y. et al. Epidemiology of tuberculosis in Kazakhstan: data from the Unified National Electronic Health System. *Public Health in Practice*, **2023**, 5: 100364. <https://doi.org/10.1016/j.puhip.2023.100364>
4. International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas. 10th ed. Brussels: IDF; **2021**.
5. Franco J.V., Arriola I., Meza N. et al. Diabetes as a risk factor for tuberculosis disease: an updated systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, **2024**, 19(2): e0301234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301234>
6. Krishna S., Vallerskog T. Diabetes Mellitus and Tuberculosis. In: Feingold KR, Anawalt B, Boyce A, eds. *Endotext*. South Dartmouth (MA): MDText.com, Inc.; **2021**.
7. Antonio-Arques V., Roldan E.J., Moreno S. et al. Glycemic control and the risk of tuberculosis in patients with diabetes: a systematic review. *Front. Public Health*, **2022**, 10: 1017024. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1017024>
8. Goletti D., Meintjes G., Estaji F. et al. Insights from the 2024 WHO Global Tuberculosis Report – More Comprehensive Action, Innovation, and Investments Required. *Int. J. Infect. Dis.*, **2025**, 150: 107325. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2024.107325>
9. Amartsengel O., Munkhbat B., Enkhjargal G. et al. Tuberculosis trends in Kazakhstan and Mongolia (2017–2021): GBD analysis. *Front. Public Health*, **2025**, 13: 1575107. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1575107>
10. Bekshin Z., Zhunussov Y., Sakko Y. et al. TB and COVID-19 mortality impact in Kazakhstan (2018–2024). *Pathogens*, **2025**, 14(6): 559. <https://doi.org/10.3390/pathogens14060559>
11. Kalizhanova A., Yerezhepov D., Kadyrov S. et al. Modeling tuberculosis dynamics in Kazakhstan using SARIMA and SIR. *Sci. Rep.*, **2024**, 14: 76721. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76721-2>
12. Yerezhepov D., Kalizhanova A., Kadyrov S. et al. Pulmonary TB epidemiology and genetics in Kazakhstan. *Front. Public Health*, **2024**, 12: 1340673. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1340673>
13. Yerezhepov D., Kalizhanova A., Kadyrov S. et al. Vitamin D status, VDR/TLR polymorphisms and pulmonary TB in Kazakhstan. *Nutrients*, **2024**, 16(4): 558. <https://doi.org/10.3390/nu16040558>
14. Bai W., Liu H., Xu J. et al. Global and national trends in TB incidence and risk factors, 2000–2021. *BMC Public Health*, **2024**, 24: 17495. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-17495-6>
15. Ledesma J.R., Garcia-Basteiro A.L., Cords O. et al. Global age-specific progress towards End TB Strategy: GBD Study 2021. *Lancet Infect. Dis.*, **2024**, 24(7): 1234–1249. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(24\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(24)00007-0)
16. Tiemersma E.W., van der Werf M.J., Borgdorff M.W. et al. Natural history of untreated pulmonary TB: a systematic review. *PLoS One*, **2011**, 6(4): e17601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017601>
17. Lönnroth K., Castro K.G., Chakaya J.M. et al. TB control and elimination 2010–2050. *Lancet*, **2010**, 375(9728): 1814–1829. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60483-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60483-7)

18. Houben R.M.G.J., Dodd P.J. The global burden of latent TB infection: a re-estimation. *PLoS Med*, **2016**, 13(10): e1002152. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002152>
19. Jeon C.Y., Murray M.B. Diabetes mellitus increases TB risk: a systematic review. *PLoS Med*, **2008**, 5(7): e152. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050152>
20. Restrepo B.I. Diabetes and tuberculosis. *Microbiol. Spectrum*, **2016**, 4(6): TNMI7-0023-2016. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.TNMI7-0023-2016>
21. Ruslami R., Aarnoutse R.E., Alisjahbana B. et al. Implications of the global increase of diabetes for TB control. *Trop. Med. Int. Health*, **2010**, 15(11): 1289–1299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2010.02625.x>
22. Critchley J.A., Restrepo B.I., Ronacher K. et al. Defining a research agenda to address the converging epidemics of TB and diabetes: part 1. *Chest*, **2017**, 152(1): 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2017.02.010>
23. Dooley K.E., Chaisson R.E. Tuberculosis and diabetes mellitus: convergence of two epidemics. *Lancet Infect. Dis.*, **2009**, 9(12): 737–746. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(09\)70282-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(09)70282-8)
24. Marais B.J., Lönnroth K., Lawn S.D. et al. TB comorbidity with communicable and non-communicable diseases: integrating health services. *Lancet Infect. Dis.*, **2013**, 13(5): 436–448. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(13\)70015-X](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(13)70015-X)
25. Huangfu P., Ugarte-Gil C., Golub J. et al. Diabetes and TB disease: epidemiology, pathophysiology, and outcomes. *Clin. Microbiol. Rev.*, **2019**, 32(3): e00038-18. <https://doi.org/10.1128/CMR.00038-18>
26. Lee P.H., Fu H., Lai T.C. et al. Glycemic control and the risk of TB: a cohort study. *PLoS Med.*, **2016**, 13(8): e1002072. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002072>
27. Baker M.A., Harries A.D., Jeon C.Y. et al. The impact of diabetes on TB treatment outcomes: a systematic review. *BMC Med.*, **2011**, 9: 81. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-9-81>
28. Jiménez-Corona M.E., Cruz-Hervert L.P., García-García L. et al. Association of diabetes and TB: impact on disease severity. *Clin. Infect. Dis.*, **2013**, 57(2): 146–154. <https://doi.org/10.1093/cid/cit193>
29. Alisjahbana B., Sahiratmadja E., Nelwan E.J. et al. Type 2 diabetes mellitus effect on pulmonary TB presentation and treatment response. *Clin. Infect. Dis.*, **2007**, 45(4): 428–435. <https://doi.org/10.1086/519841>
30. Magee M.J., Narayan K.M.V. Global confluence of infectious and non-communicable diseases: the case of diabetes. *Prev. Med.*, **2013**, 57(3): 149–151. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2013.05.014>
31. Kapur A., Harries A.D., Lönnroth K. et al. Diabetes and TB co-epidemic: the double challenge. *Diabetes Res. Clin. Pract.*, **2013**, 101(1): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2013.03.001>
32. Noubiap J.J., Nansseu J.R., Nyaga U.F. et al. Global prevalence of diabetes in active TB: meta-analysis of 2.3M patients. *BMJ Open Diabetes Res. Care*, **2019**, 7(1): e000736. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2019-000736>
33. World Health Organization; The Union. *Collaborative framework for care and control of TB and diabetes*. Geneva: WHO & The Union, **2011**, Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26290931/>
34. World Health Organization. *WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 4: Treatment and care*. Geneva: WHO, **2025**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240107243>
35. World Health Organization. *Operational handbook on TB. Module 4: Treatment—drug-resistant TB (2022 update)*. Geneva: WHO, **2022**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240065116>
36. World Health Organization; UNICEF. *Statement on child-friendly fixed-dose combinations for TB in children*. Geneva: WHO & UNICEF, **2017**, Available at: <https://www.who.int/news/item/24-03-2017-who-and-unicef-issue-joint-statement-on-the-use-of-child-friendly-fixed-dose-combinations-for-the-treatment-of-tb-in-children>
37. World Health Organization. *World's first child-friendly TB medicines in correct doses*. Geneva: WHO, **2015**, Available at: <https://www.who.int/news/item/02-12-2015-world-s-first-child-friendly-tb-medicines-in-correct-doses>
38. Stop TB Partnership; Global Drug Facility. *Pediatric formulations: access page*. Geneva: Stop TB Partnership; **2024**.
39. UNICEF Supply Division. *Medicines (paediatric/dispersible formulations)*. Copenhagen: UNICEF, **2024**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240006997>

40. Agrawal S., Kaur K.J., Singh I. et al. Comparative bioavailability of rifampicin, isoniazid and pyrazinamide from FDC vs separate formulations. *Int. J. Pharm.*, **2004**, 276(1–2): 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2004.02.019>
41. Xu J., Jin H., Zhu H. et al. Oral bioavailability of rifampicin, isoniazid, ethambutol and pyrazinamide in FDC vs separate formulations. *Clin. Ther.*, **2013**, 35(2): 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2013.01.003>
42. Court R., Chirehwa M.T., Wiesner L. et al. Quality assurance of rifampicin-containing FDCs in South Africa: dosing implications. *Int. J. Tuberc. Lung Dis.*, **2018**, 22(5): 537–543. <https://doi.org/10.5588/ijtld.17.0697>
43. Ki M.S., Jeong D., Kang H.Y. et al. Real-world impact of FDCs on treatment outcomes of drug-susceptible TB. *BMJ Open Respir. Res.*, **2023**, 10(1): e001758. <https://doi.org/10.1136/bmjresp-2023-001758>
44. European Medicines Agency. *Sirturo (bedaquiline): EPAR – product information*. Amsterdam: EMA, **2024**, Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/sirturo>
45. U.S. Food and Drug Administration. *SIRTURO® (bedaquiline) tablets – Prescribing Information*. Silver Spring, MD: FDA, **2024**, Available at: https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/applletter/2024/204384Orig1s019ltr.pdf
46. European Medicines Agency. *Delyba (delamanid): EPAR – product information*. Amsterdam: EMA, **2024**, Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/delyba>
47. U.S. Food and Drug Administration. *Pretomanid tablets – Prescribing Information (212862/S-008)*. Silver Spring, MD: FDA, **2024**, Available at: https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2024/212862s008lbl.pdf
48. European Medicines Agency. *Dovprela (pretomanid): EPAR – product information*. Amsterdam: EMA, **2024**, Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/dovprela>
49. Meagher A.K., Forrest A., Rayner C.R. et al. Population pharmacokinetics of linezolid in patients given enteral feedings. *Antimicrob. Agents Chemother.*, **2003**, 47(2): 548–553. <https://doi.org/10.1128/AAC.47.2.548-553.2003>
50. Bouza E., Muñoz P. Linezolid: pharmacokinetic characteristics and clinical studies. *Clin. Microbiol. Infect.*, **2001**, 7(Suppl 4): S75–S82. <https://doi.org/10.1046/j.1469-0691.2001.00061.x>
51. Beringer P., Nguyen M., Hoem N., et al. Absolute bioavailability and pharmacokinetics of linezolid in hospitalized patients. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, **2005**, 49(9): 3676–3681. <https://doi.org/10.1128/AAC.49.9.3676-3681.2005>
52. Tikiso T., McIlleron H., Abdelwahab M.T., et al. Population pharmacokinetics of ethambutol in African children: a pooled analysis. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, **2022**, 77(7): 1949–1959. <https://doi.org/10.1093/jac/dkac127>
53. Treatment Action Group. *An Activist's Guide to Rifapentine: TB Preventive Treatment (3HP and 1HP)*. New York: TAG, **2024**, Available at: <https://www.treatmentactiongroup.org/publication/activists-guide-to-rifapentine/>
54. Gillespie S.H., Crook A.M., McHugh T.D., et al. Four-month moxifloxacin-based regimens for drug-sensitive TB (REMoxTB). *New England Journal of Medicine*, **2014**, 371(17): 1577–1587. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1407426>
55. Jindani A., Harrison T.S., Nunn A.J., et al. High-dose rifapentine with moxifloxacin for pulmonary TB (RIFAQUIN). *New England Journal of Medicine*, **2014**, 371(17): 1599–1608. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1314210>
56. Merle C.S., Fielding K., Sow O.B., et al. A four-month gatifloxacin-containing regimen for TB (OFLOTUB). *New England Journal of Medicine*, **2014**, 371(17): 1588–1598. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1315817>
57. Sterling T.R., Villarino M.E., Borisov A.S., et al. Three months of rifapentine and isoniazid for latent TB infection. *New England Journal of Medicine*, **2011**, 365(23): 2155–2166. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1104875>
58. Swindells S., Ramchandani R., Gupta A., et al. One month of rifapentine plus isoniazid to prevent HIV-related TB. *New England Journal of Medicine*, **2019**, 380(11): 1001–1011. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1806808>
59. Boeree M.J., Heinrich N., Aarnoutse R., et al. High-dose rifampicin, moxifloxacin and SQ109 for drug-sensitive TB (PanACEA MAMS-TB). *Lancet Infectious Diseases*, **2017**, 17(1): 39–49. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30274-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30274-2)

60. Menzies D., et al. Four Months of Rifampin or Nine Months of Isoniazid for Latent Tuberculosis in Adults. *N Engl J Med.*, **2018**, 379(5): 440–453. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1714283>
61. Conradie F., Diacon A.H., Ngubane N., et al. Treatment of highly drug-resistant pulmonary tuberculosis with BPaL regimen. *New England Journal of Medicine*, **2020**, 382(10): 893–902. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1901814>
62. Conradie F., Everitt D., Olugbosi M., et al. Treatment of drug-resistant tuberculosis with bedaquiline, pretomanid and linezolid (ZeNix Trial). *New England Journal of Medicine*, **2022**, 387(9): 810–823. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2117764>
63. Trébucq A., Schwoebel V., Kashongwe Z., et al. Short-course regimen for MDR-TB in West Africa. *Lancet Infectious Diseases*, **2018**, 18(11): 1180–1188. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(18\)30460-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(18)30460-1)
64. Volmink J., Garner P. Directly observed therapy for treating tuberculosis. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, **2015**, (5):CD003343. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003343.pub4>
65. Fox G.J., Menzies D. A review of the use of rifapentine for latent tuberculosis infection. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, **2013**, 17(12): 1435–1441. <https://doi.org/10.5588/ijtld.13.0354>
66. Lienhardt C., Nahid P. Advances in clinical trial design for development of new tuberculosis treatments: a call for innovation. *Lancet Infectious Diseases*, **2019**, 19(3): e64–e72. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(18\)30611-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(18)30611-8)
67. Nunn A.J., Phillips P.P.J., Meredith S.K., et al. A trial of a shorter regimen for rifampin-resistant tuberculosis. *New England Journal of Medicine*, **2019**, 380(13): 1201–1213. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1811867>
68. Seddon J.A., Thee S., Jacobs K., et al. Hearing loss in patients on aminoglycosides for drug-resistant tuberculosis: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Infectious Diseases*, **2013**, 56(3): 391–400. <https://doi.org/10.1093/cid/cis770>
69. Albanna A.S., Smith B.M., Cowan D., et al. Fixed-dose combination anti-tuberculosis therapy: a systematic review and meta-analysis. *European Respiratory Journal*, **2013**, 42(3): 721–732. <https://doi.org/10.1183/09031936.00131812>
70. World Health Organization. *WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 1: Prevention — tuberculosis preventive treatment*, 2nd ed. Geneva: WHO, **2024**, Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39298638/>
71. World Health Organization. *Drug-resistant tuberculosis treatment: 2022 update*. Geneva: WHO, **2022**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240063129>
72. World Health Organization. *Rapid communication: key updates to the treatment of drug-resistant TB*. Geneva: WHO, **2024**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240095878>
73. National Institute for Health and Care Excellence (NICE). *Tuberculosis (NG33)*. London: NICE, **2016** (reviewed 2024), Available at: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33>
74. Mirzayev F., Viney K., Linh N.N., et al. WHO recommendations on the treatment of drug-resistant TB, 2020 update. *European Respiratory Journal*, **2021**, 57(6): 2003300. <https://doi.org/10.1183/13993003.03300-2020>
75. Stop TB Partnership; Global Drug Facility. *TB medicines catalogue & programmatic guidance*. Geneva: Stop TB Partnership, **2024**, Available at: [2025.04.07_gdf_medicines_catalog.pdf](https://www.who.int/publications/i/item/2025.04.07_gdf_medicines_catalog.pdf)
76. Harris R.C., Khan M.S., Martin L.J., et al. Adverse events of bedaquiline, delamanid and pretomanid: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Infectious Diseases*, **2021**, 73(9): e3562–e3571. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1215>
77. Dooley K.E., Rosenkranz S.L., Conradie F., et al. QT effects and safety of bedaquiline-containing regimens: pooled patient data. *Clinical Infectious Diseases*, **2021**, 73(9): e1327–e1335. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1796>
78. Stagg H.R., Zenner D., Harris R.J., et al. Treatment of latent TB infection: a network meta-analysis. *Annals of Internal Medicine*, **2014**, 161(6): 419–428. <https://doi.org/10.7326/M14-1019>
79. Sharma M., Sarin R., Dheda K., et al. Short-course regimens for drug-susceptible TB: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Respiratory Medicine*, **2021**, 9(1): 45–54. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30382-2](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30382-2)
80. Su W., Gao M., Zhang L., et al. Efficacy and safety of BPaL/BPaLM regimens: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Microbiology and Infection*, **2023**, 29(10): 1203–1212. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2023.05.006>

81. Menzies D., Adjobimey M., Ruslami R., et al. Four months of rifampin or nine months of isoniazid for latent TB infection. *New England Journal of Medicine*, **2018**, 379(5): 440–453. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1714283>
82. Sterling T.R., Njie G., Zenner D., et al. Guidelines for the treatment of latent TB infection: 2020 update by the CDC and NTCA. *MMWR Recommendations and Reports*, **2020**, 69(1): 1–11. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mmwr.r6901a1>
83. World Health Organization. *WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 3: Diagnosis–rapid diagnostics and screening*. Geneva: WHO, **2021–2023**, Available at: <https://www.who.int/publications/b/58840>
84. WHO. Companion handbook to the WHO guidelines for programmatic management of drug-resistant TB. Geneva: WHO, **2014** (with updates), Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25320836/>
85. Nahid P., Mase S., Migliori G.B., et al. Treatment of drug-resistant TB: official ATS/CDC/ERS/IDSA clinical practice guideline. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **2019**, 200(10): e93–e142. <https://doi.org/10.1164/rccm.201909-1874ST>
86. Lönnroth K., Mor Z. TB prevention and care for people living with diabetes: a policy perspective. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, **2023**, 27(12): 1025–1036. <https://doi.org/10.5588/ijtld.23.0277>
87. Uplekar M., Weil D., Lönnroth K., et al. WHO's new End TB Strategy. *Lancet*, **2015**, 385(9979): 1799–1801. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60570-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60570-0)
88. D'Ambrosio L., Migliori G.B., Centis R., et al. Programmatic implications of all-oral regimens: from evidence to implementation. *European Respiratory Journal*, **2022**, 60(5): 2200305. <https://doi.org/10.1183/13993003.00305-2022>
89. Falzon D., Schünemann H.J., Harausz E., et al. WHO treatment guidelines for drug-resistant TB, 2016 update. *European Respiratory Journal*, **2017**, 49(3): 1602308. <https://doi.org/10.1183/13993003.02308-2016>
90. WHO. WHO consolidated tuberculosis guidelines digital platform (TB Knowledge Sharing). Geneva: WHO, **2024–2025**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240111967>
91. WHO. WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 2: Screening. Geneva: WHO, **2021**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240022676>
92. WHO. WHO operational handbook on tuberculosis. Module 2: Screening. Geneva: WHO, **2021**, Available at: <https://www.who.int/publications/b/57554>
93. WHO. WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 5: Management of TB in children and adolescents. Geneva: WHO, **2022**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240046764>
94. WHO. WHO operational handbook on tuberculosis. Module 5: Management of TB in children and adolescents. Geneva: WHO, **2022**, Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240046832>
95. WHO. WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 6: Management of TB preventive treatment. Geneva: WHO, **2020**, Available at: WHO consolidated guidelines on tuberculosis. Module 6
96. Ahmad N., Ahuja S.D., Akkerman O.W., et al. Treatment correlates of successful outcomes in pulmonary MDR-TB: IPD meta-analysis. *Lancet*, **2018**, 392(10150): 821–834. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31644-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31644-1)
97. Horne D.J., Rockwood N., Park P.K., et al. Linezolid for drug-resistant TB: systematic review and meta-analysis. *Clinical Infectious Diseases*, **2019**, 69(9): 1507–1514. <https://doi.org/10.1093/cid/ciy1125>
98. Harris R.C., Khan M.S., Martin L.J., et al. Adverse events of bedaquiline, delamanid and pretomanid: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Infectious Diseases*, **2021**, 73(9): e3562–e3571. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1215>
99. Dooley K.E., Rosenkranz S.L., Conradie F., et al. QT effects and safety of bedaquiline-containing regimens: pooled analysis of patient data. *Clinical Infectious Diseases*, **2021**, 73(9): e1327–e1335. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1796>

INTERPOLYMER SYSTEMS OF POLY(METHACRYLIC ACID): POLY(4-VINYLPYRIDINE) FOR THE SELECTIVE SORPTION AND DESORPTION OF RHENIUM IONS

**A.Baishibekov^{*1,4}, T.Jumadilov² D.Fischer¹, J.Haponiuk³, S.Temirova¹,
S.Yulusov¹, B.Altabayev¹, D. Karim¹**

¹Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan

³Gdańsk University of Technology, Gdansk, Poland

⁴Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: abayshibekov@gmail.com

Abstract. *Introduction.* Rhenium is a rare transition metal used in alloys and catalysis. Industrial recovery comes mainly from sulfuric acid effluents formed during copper and molybdenum processing. Sorption is the main method, but the choice of effective sorbents remains an issue. *Aims.* Interpolymer systems (IPS) of poly(methacrylic acid) (PMAA) and poly(4-vinylpyridine) (P4VP) were prepared and tested. IPS samples with different PMAA:P4VP ratios were prepared and tested. Sorption capacity, desorption behavior, and structural as well as thermal characteristics were investigated. *Results and Discussion.* The sorption efficiency varies with polymer composition. The 2:4 PMAA:P4VP ratio gave the highest uptake. Desorption in 2% nitric acid was moderate, with a maximum of about 75.6%. FTIR spectra showed shifts in carboxyl and pyridyl bands, confirming the role of functional groups. TGA/DSC data indicated stabilization of the polymer network after rhenium binding. *Conclusion.* The PMAA:P4VP system at a 2:4 ratio combined high sorption, moderate desorption, and improved structural stability. This system may be applied for rhenium recovery from metallurgical wastewater.

Keywords: interpolymer systems, rhenium extraction, poly(methacrylic acid) (PMAA), poly(4-vinylpyridine) (P4VP), ammonium perrhenate, selective sorption and desorption, polymer-based sorbents

Jumadilov Talkybek Kozhatayevich	Doctor of Chemical Sciences, Professor; E-mail: jumadilov@mail.ru
Fischer DametkenYedilovna	Head of the laboratory of rare scattered elements, Candidate of Chemical Sciences; E-mail: d.fischer@satbayev.university
Baishibekov Arman Makatuly	Junior research assistant; E-mail: abayshibekov@gmail.com
Haponiuk Jozef	Professor; E-mail: jozef.haponiuk@pg.edu.pl
Temirova Saniya Samidullaeyvna	Leading Researcher, Candidate of chemical sciences; E-mail: s.temirova@satbayev.university
Yulusov Sultan Baltabayevich	PhD, Researcher; E-mail: s.yulusov@satbayev.university
Altabayev Bagdat Tolbasuly	PhD, Research Associate; E-mail: b.altabayev@satbayev.university
Karim Diana Dauletovna	Engineer; E-mail: d.karim@satbayev.university

Citation: Baishibekov A., Fischer D., Temirova S., Yulusov S., Altabayev B., Karim D. Interpolymer systems of poly(methacrylic acid):poly(4-vinylpyridine) for the selective sorption and desorption of rhenium ions. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 78-86. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.52>

1. Introduction

Rhenium (Re) the rare transition metals with a high melting point (3186 °C), mechanical strength, and resistance to extreme conditions. These properties make it important in superalloys for gas turbines, jet engines, and nuclear devices [1–9]. Rhenium also has multiple oxidation states (–1 to +7), which allows its compounds to be used as catalysts in petroleum refining and other processes [10–20].

Primary deposits of rhenium are very limited. The element occurs in trace amounts in copper and molybdenum sulfide ores, usually below 0.2 wt% [1–20]. During roasting, rhenium forms volatile Re_2O_7 , which is absorbed from flue gases in sulfuric acid solutions. These acid solutions remain the main industrial source [22,23]. Secondary sources are also used, including spent Pt–Re catalysts, turbine components, and rhenium-containing alloy scrap [11, 12].

Recovery is mainly performed by solvent extraction or sorption. Sorption attracts interest because sorbents can be designed with selectivity toward perrhenate ions [13–16]. Various sorbents have been studied, such as activated carbons, layered double hydroxides, and metal–organic frameworks [17, 18].

Recently, interpolymer systems (IPS) have been tested as alternatives. They combine acidic and basic polymers in one system. Cooperative effects in these systems often result in higher sorption compared with single polymers. One mechanism is remote functional group interaction. Jumadilov et al. (2012) reported that when polyacidic and polybasic hydrogels contact through a shared aqueous phase, long-range electrochemical effects and conformational changes can activate or suppress functional groups. This leads to higher sorption capacity and system response [18–20].

This work investigates IPSs based on poly(methacrylic acid) (PMAA) and poly(4-vinylpyridine) (P4VP) for recovery of rhenium from ammonium perrhenate solutions. Considering the limited natural reserves of rhenium and its strategic importance, these systems can be considered as a sustainable approach for treating metallurgical effluents.

2. Materials and Methods

A total of eight PMAA/P4VP hydrogel–rhenium samples were prepared. Four contained rhenium in the form of perrhenate, and four contained hydroxide species. P4VP ($M_w \approx 160,000$; Sigma-Aldrich) was used as the electron-donating polymer.

Hydrogels were obtained either by polymerization of water-soluble monomers or by crosslinking within a gel matrix. PMAA and P4VP gels were synthesized separately.

All reagents were of analytical grade: ammonium perrhenate (NH_4ReO_4 , $\geq 99.9\%$), sodium hydroxide ($\geq 98\%$), sulfuric acid, and nitric acid ($> 90\%$).

Thermal analysis was performed using TG 209 F3 Tarsus (NETZSCH) and TGA/SDTA 851e (Mettler Toledo). FTIR spectra were recorded on a JASCO FT/IR-6X spectrometer ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, KBr). pH values were measured with a

pH200EM REX meter. Masses were determined on a Shimadzu AX200 balance. Rhenium concentrations were analyzed by spectrophotometry and AAS-3C.

Model rhenium solutions ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as Re) were prepared by dissolving 28.8 mg of NH_4ReO_4 in distilled water and diluting to 200 mL. The solutions were kept in the dark to avoid photodegradation. Polymer samples were enclosed in woven semi-permeable bags and immersed for 0.5–48 h. PMAA:P4VP molar ratios ranged from 6:0 to 0:6. Aliquots of 5 mL were withdrawn at fixed intervals and analyzed for residual rhenium. Polymer amounts were calculated from the repeat-unit molar masses of PMAA ($86 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) and P4VP ($105 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), keeping the total number of units constant, equal to that in 0.030 g of PMAA at a 6:0 ratio.

Desorption was performed using freshly prepared 2% HNO_3 . After sorption, polymer samples were transferred into the acid solution and kept for 24–48 h. The desorption degree (R, %) was calculated from the residual rhenium concentration.

3. Results and discussion

Sorption behavior

The efficiency of rhenium uptake by the PMAA:P4VP systems depended on polymer ratio and contact time (Figure 1). In the initial period (0.5–2.5 h), residual concentrations of Re(VII) remained high for most system, showing the slow stage of binding. After 6 h, a marked decrease in concentration was observed, especially in systems with balanced polymer ratios.

The 2:4 PMAA:P4VP system was the most effective. After 48 h, the residual concentration decreased to 68.9 mg/L, which corresponded to the maximum sorption capacity. Systems with ratios 6:0 and 0:6 showed much lower efficiency. This confirmed that cooperative interaction of acidic and basic components was necessary for effective sorption.

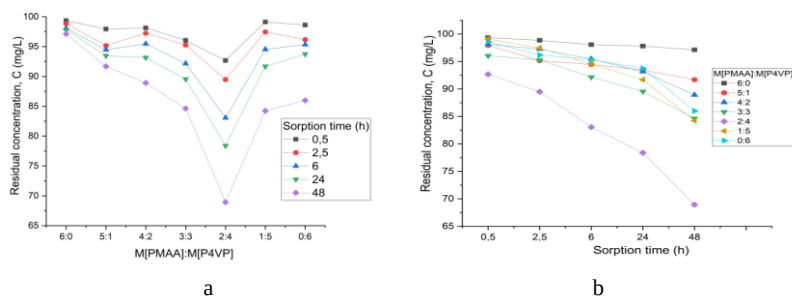


Figure 1 - Dependence of Re(VII) concentration in solution (C_e , mg/L) on (a) the polymer ratio PMAA:P4VP and (b) contact time.

Desorption performance

Desorption with 2% HNO_3 showed clear differences depending on the polymer system (Figure 2). The 2:4 PMAA:P4VP system had the highest desorption degree (23.5 mg/L). Although binding was strong, a fraction of

rhenum ions could be recovered under acidic conditions. Separate tests of the polymers showed that P4VP contributed more strongly than PMAA, in line with the donor character of its pyridine groups. The results confirm that P4VP is the key component in the sorption–desorption mechanism.

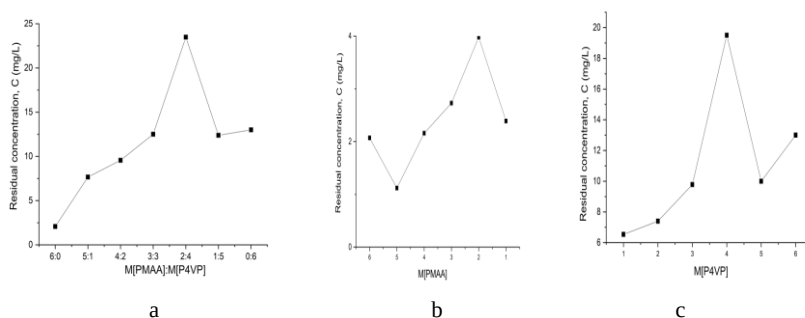


Figure 2 - Desorption behavior of rhenum ions (Cd, mg/L) as a function of (a) the PMAA:P4VP molar ratios, (b) the PMAA ion-exchange component, and (c) the P4VP ion-exchange component.

Thermal analysis (TGA/DSC)

Thermal analysis of pristine PMAA and P4VP showed characteristic stages of water loss and polymer degradation (Figure 3, Figure 4). After of rhenum sorption, both polymers demonstrated higher thermal stability in the 2:4 PMAA:P4VP system (Figure 5, Figure 6). This stabilization is attributed to stronger intermolecular interactions and coordination bonds between rhenum ions and polymer functional groups. These interactions restricted polymer chain mobility and shifted the onset of decomposition to higher temperatures. The observed changes in DSC and TGA/DTG thermograms confirm that rhenum binding increases the thermal stability of both PMAA and P4VP.

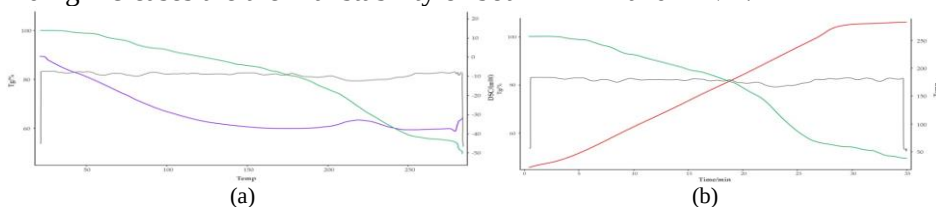


Figure 3 - DSC/(a) and TGA/ (b) DTG thermogram of PMAA before rhenum sorption.

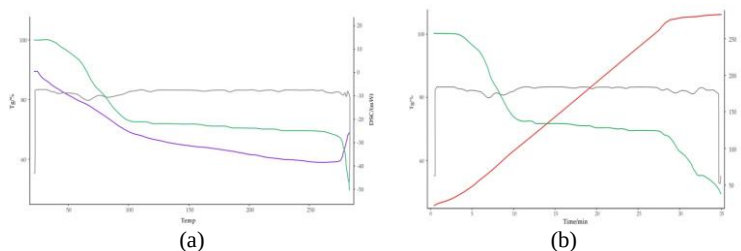


Figure 4 - DSC/(a) and TGA/ (b) DTG thermogram of P4VP before rhenum sorption

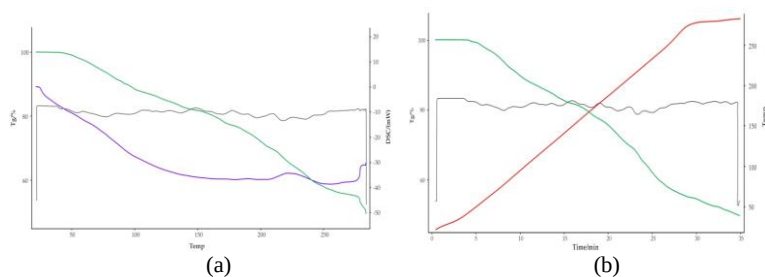


Figure 5 - DSC/(a) and TGA/ (b) DTG thermogram of PMAA after rhodium sorption in PMAA:P4VP (2:4 molar ratio).

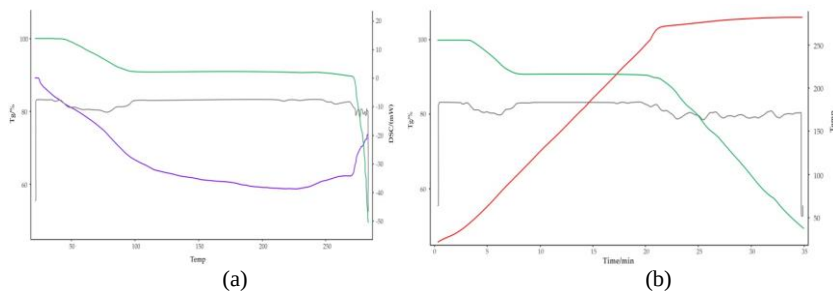


Figure 6 - DSC/(a) and TGA/ (b) DTG thermogram of P4VP after rhodium sorption in PMAA:P4VP interpolymer system (2:4 molar ratio).

FTIR spectroscopy

FTIR spectra confirmed the interaction of rhodium ions with functional groups of both polymers. In pristine PMAA, strong absorption bands were observed in the region of carboxyl group vibrations, while P4VP showed characteristic pyridine ring modes (Figure 7). After rhodium sorption, distinct spectral changes were detected (Figure 8). In PMAA, the C=O stretching band shifted, indicating coordination of the carboxyl groups with Re(VII). In P4VP, changes in the pyridine ring vibrations confirmed the donor–acceptor role of pyridyl groups. These observations demonstrate that both polymers take part in binding, with P4VP contributing more strongly due to its electron-donor character.

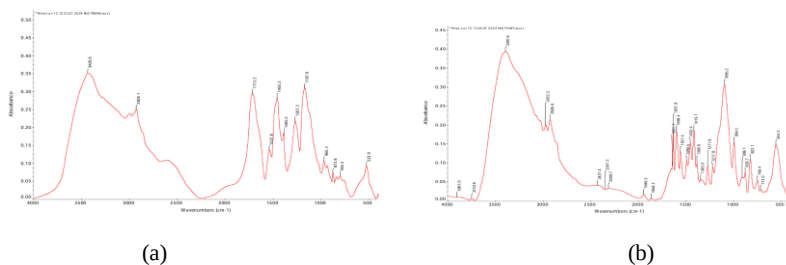


Figure 7 - FTIR spectra of pristine PMAA (a) and pristine P4VP (b) in the interpolymer system 2:4 PMAA:P4VP.

The FTIR spectra of the polymer PMAA (a) and P4VP (b) after the sorption of rhenium ions from a model solution are represented in Fig. 8.

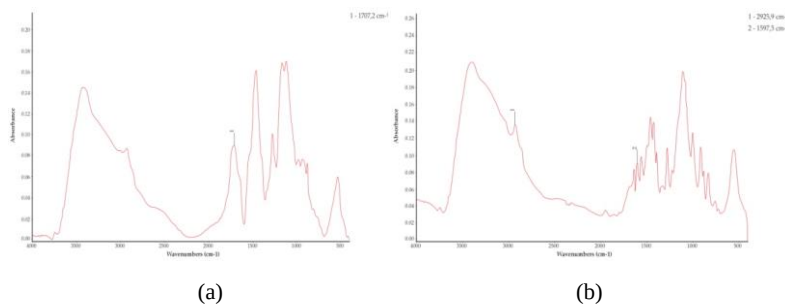


Figure 8 - FTIR spectra of PMAA (a) and P4VP (b) after rhenium ion sorption in the interpolymer system 2:4 PMAA:P4VP.

General interpretation

The combined sorption, desorption, thermal, and spectroscopic results indicate a synergistic effect in PMAA:P4VP systems. The 2:4 ratio gave the best performance. At this composition, acidic and basic groups worked in balance, which increased sorption and improved structural stability. The results confirm that weakly cross-linked interpolymer complexes can act as selective sorbents for rhenium recovery.

4. Conclusion

Sorption and desorption of ReO_4^- in PMAA:P4VP interpolymer systems were investigated. Sorption efficiency was determined mainly by functional group interactions. The 2:4 PMAA:P4VP ratio showed the highest uptake capacity. Desorption was driven largely by the electron-donor contribution of P4VP. Weakly acidic–basic interpolymer systems are suitable as selective and reusable sorbents for rhenium recovery from aqueous solutions.

Spectroscopic (FTIR) and thermal (TGA/DSC) measurements showed that the interaction of carboxyl and pyridyl groups with Re(VII) ions promoted stabilization of the polymer matrix. The structural and thermal changes noted above confirm direct participation of both active elements and show that P4VP takes the front throne, because of electron-donor properties of its pyridine moieties. Thus, cooperating interpolymer effects play an important role in designing advanced sorbents.

From a real-world application perspective, the PMAA:P4VP system is a low-cost, reusable, and environmentally friendly sorbent for rhenium recovery from metallurgical effluents based on a high sorption capacity, moderate desorption and increasing material stability. For a broader application, future studies should confirm their efficiency in real wastewater, study long-lasting sorption–desorption cycles at plants, and apply this strategy to other important metals like molybdenum and tungsten, to expand sustainable polymer-based methods for rare-metal recovery.

Funding: This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23489278).

Acknowledgments: The authors gratefully acknowledge the support provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Conflicts of Interest: The authors declare no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

РЕНИЙ ИОНДАРЫН ТАҢДАМАЛЫ СОРБЦИЯ ЖӘНЕ ДЕСОРБЦИЯЛАҒАНДАҒЫ ПОЛИ (4-ВИНИЛПИРИДИН):ПОЛИ (МЕТАКРИЛ ҚЫШҚЫЛЫ) ИНТЕРПОЛИМЕРЛІ ЖҮЙЕСІ

*А.Байшибеков^{*1,4}, Т.Жұмаділов², Д.Фишер¹, Ю.Хапонюк³,
С.Темирова¹, С.Юлусов¹, Б. Алтайбаев¹, Д.Карім¹*

¹ АҚ Металлургия және кен байыту институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан

² Ә.Б. Бектұров атындағы АҚ Химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан

³ Гданьск технологиялық университеті, Гданьск, Польша

⁴ Қазақ ұлттық педагогикалық университеті. Абай, Алматы, Қазақстан

Түйіндемесі. *Кіріспе.* Рений – қорытпалар мен катализде қолданылатын сирек кездесетін өтпелі металл. Өнеркәсіпте ол негізінен мыс пен молибденді өңдеу кезінде пайда болатын күкірт қышқылының қалдықтарынан алынады. Негізгі әдіс ретінде сорбция болып табылады, бірақ тиімді сорбенттерді таңдау проблема болып қала береді. *Мақсаттар.* Поли (метакрил қышқылы) (РМАО) және поли (4-винилпиридин) (Р4VP) интерполимерлік жүйелер (IPS) алынды және сыналды. РМАО:Р4VP қатынасы әртүрлі ЖЗШ үлгілері алынды және сыналды. Сорбциялық қабілеті, десорбциялық қасиеттері, құрылымдық және термиялық сипаттамалары зерттелді. *Нәтижелер және талқылау.* Сорбцияның тиімділігі полимердің құрамына байланысты. РМАО:Р4VP қатынасы 2:4 қатынасында ең жақсы сіңіруді қамтамасыз етеді. 2% азот қышқылындағы десорбция орташа, максимум шамамен 75,6% болды. ИҚ спектрлері функционалды топтардың рөлін растайтын карбоксил мен пиридил жолақтарында ығысулар көрсетті. TGA/DSC деректері рениймен байланысқаннан кейін полимерлі тордың тұрақтануын көрсетті. *Қорытынды.* РМАО:Р4VP жүйесі 2:4 қатынасында жоғары сорбцияны, орташа десорбцияны және жақсартылған құрылымдық тұрақтылықты біріктіреді. Бұл жүйені металлургиялық кәсіпорындардың ағынды суларынан рений алу үшін қолдануға болады.

Түйін сөздер: интерполимерлік жүйелер, рений экстракциясы, поли (метакрил қышқылы) (рмаа), поли (4-винилпиридин) (Р4VP), аммоний перренаты, селективті сорбция және десорбция, полимер негізіндегі сорбенттер

<i>Жұмаділов Талқыбек</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор</i>
<i>Қожаатайұлы</i>	
<i>Фишер Дәметкен Еділқызы</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Байшибеков Арман Мақатұлы</i>	<i>Кіші ғылыми қызметкер</i>
<i>Хапонюк Йозеф</i>	<i>Профессор</i>
<i>Темирова Сания Самидуллаевна</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Юлусов Султан Балтабаевич</i>	<i>Зерттеуші</i>
<i>Алтайбаев Бағдат Толбасұлы</i>	<i>Ғылыми қызметкер</i>
<i>Карим Диана Даулетовна</i>	<i>инженер</i>

ИНТЕРПОЛИМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛИ(МЕТАКРИЛОВАЯ КИСЛОТА): ПОЛИ (4-ВИНИЛПИРИДИН) ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ИОНОВ РЕНИЯ

*А.Байшибеков^{*1,4}, Т. Джумадилов², Д.Фишер¹, Ю.Хапонюк³,
С.Темирова¹, С.Юлусов¹, Б. Алтайбаев¹, Д. Карим¹*

¹ АО "Институт металлургии и обогащения", Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан

² АО "Институт химических наук им. А.Б. Бектурова", Алматы, Казахстан

³ Гданьский технологический университет, Гданьск, Польша

⁴ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

Резюме. *Вступление.* Рений - редкий переходный металл, используемый в сплавах и катализе. В промышленности его извлекают в основном из сернокислотных отходов, образующихся при переработке меди и молибдена. Основным методом является сорбция, но выбор эффективных сорбентов остается проблемой. *Цели.* Были получены и протестированы интерполимерные системы (ИПС) из поли (метакриловой кислоты) (РМАО) и поли (4-винилпиридина) (Р4VP). Были получены и протестированы образцы IPS с различным соотношением РМАО:Р4VP. Были исследованы сорбционная способность, десорбционные свойства, структурные и термические характеристики. *Результаты и обсуждение.* Эффективность сорбции зависит от состава полимера. Соотношение РМАО:Р4VP в соотношении 2:4 обеспечивает наилучшее поглощение. Десорбция в 2%-ной азотной кислоте была умеренной, максимальная - около 75,6%. ИК-спектры показали сдвиги в карбоксильных и пиридинных полосах, подтверждающие роль функциональных групп. Данные TGA/DSC показали стабилизацию полимерной сетки после связывания с рением. *Вывод.* Система РМАО:Р4VP в соотношении 2:4 сочетает в себе высокую сорбцию, умеренную десорбцию и улучшенную структурную стабильность. Эта система может применяться для извлечения рения из сточных вод металлургических предприятий.

Ключевые слова: интерполимерные системы, извлечение рения, поли (метакриловая кислота) (РМАО), поли (4-винилпиридин) (Р4VP), перренат аммония, селективная сорбция и десорбция, сорбенты на основе полимеров

<i>Джумадилов Талкыбек Кожатаевич</i>	<i>Доктор химических наук, профессор</i>
<i>Фишер Даметкен Едиловна</i>	<i>Кандидат химических наук</i>
<i>Байшибеков Арман Мақатұлы</i>	<i>Младший научный сотрудник</i>
<i>Хапонюк Йозеф</i>	<i>Профессор</i>
<i>Темирова Саня Самидуллаевна</i>	<i>Кандидат химических наук</i>
<i>Юлусов Султан Балтабаевич</i>	<i>Исследователь</i>
<i>Алтайбаев Багдат Толбасулы</i>	<i>Научный сотрудник</i>
<i>Карим Диана Даулетовна</i>	<i>инженер</i>

References

1. Kinas, S.; Jermakowicz-Bartkowiak, D.; Pohl, P.; Dzimitrowicz, A.; Cyganowski P. On the path of recovering platinum-group metals and rhenium: A review on the recent advances in secondary-source and waste materials processing. *Hydrometallurgy* **2024**, 223, 106222, DOI:10.1016/j.hydromet.2023.106222
2. Skoczylas, P.; Kaczorowski, M. Preliminary Study of the Rhenium Addition on the Structure and Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloy. *Materials* **2021**, 14(23), 7365, DOI:10.3390/ma14237365
3. Ma, Zh.; Ma, L.; Chen, X.; Wang, X.; Tan, Y.; Yang, W.; Wang, Sh.; Yan, L.; Zhu, K.; Ding, Y. Highly efficient and stable rhenium modified nickel catalyst for hydrogenation of nitriles to primary amines. *Chem. Eng. J.* **2023**, 466, 143238, DOI:10.1016/j.cej.2023.143238
4. Ramírez, A.M.R.; Heidari, S.; Vergara, A.; Aguilera, M.V.; Preuss, P.; Camarada, M. B.; Fischer, A. Rhenium-Based Electrocatalysts for Water Splitting. Review. *ACS Mater. Au.* **2023**, 3 (3), DOI:10.1021/acsmaterialsau.2c00077

5. Luo, J.; Liang, Ch. Rhenium in Heterogeneous Catalysis: A Rising Star for Hydrogenation Reactions. *ACS Catal.* **2024**, 14, 9, DOI:10.1021/acscatal.4c00298
6. Kim, J.; Oh, J.; Baskaran, S.; Kim, T. G.; Kim, S.; Yang, J.; Jung, J.; Yoon S.M. Rhenium redefined as electrocatalyst: Hydrogen evolution efficiency boost via Pt and Ni doping. *Appl. Catal. B-Environ. Energy* **2024**, 347, 123791, DOI:10.1016/j.apcatb.2024.123791
7. Vikanova, K.V.; Kustov, L.; Makhov, E.A.; Tkachenko, O.P.; Kapustin, G.I.; Kalmykov, K.B.; Mishin, I.V.; Nissenbaum, V.D.; Dunaev, S.F.; Kustov L.M. Rhenium-contained catalysts based on superacid ZrO₂ supports for CO₂ utilization. *Fuel*. **2023**, 351, 128956. DOI:10.1016/j.fuel.2023.128956
8. Gothe, M. L.; Silva, K. L. C.; Figueredo, A. L.; Fiorio, J. L.; Rozendo, J.; Manduca, B.; Simizu, V.; Freire, R. S.; Garcia, M. A. S.; Vidinha, P. Rhenium – A Tuneable Player in Tailored Hydrogenation Catalysis. *Eur. J. Inorg. Chem.* **2021**, 2021(39), 4043-4065, DOI:10.1002/ejic.202100459
9. S. Kinas, Dorota Jermakowicz-Bartkowiak, Paweł Pohl, Anna Dzimitrowicz, Piotr Cyganowski. On the path of recovering platinum-group metals and rhenium: A re-view on the recent advances in secondary-source and waste materials processing. *Hydrometallurgy* **2024**, 223, 106222, DOI:10.1016/j.hydromet.2023.106222
10. Du, J.; Dong, Zh.; Wen, D.; Yang, X.; Zhai, M.; Hua, R.; Zhao, L. Selective recovery of rhenium from the simulating leaching solutions of uranium ore by amino guanidine functionalized microcrystalline cellulose microsphere. *J. Mol. Liq.* **2022**, 360, 119399, DOI:10.1016/j.molliq.2022.119399
11. Werner, T. T.; Mudd, G. M.; Jowitt, S. M.; Huston D. Rhenium mineral resources: A global assessment. *Resour. Policy.* **2023**, 82, 103441, DOI:10.1016/j.resourpol.2023.103441
12. Feng, J.; Yu, H.; Wang, Y.; Li, H.; Li, J.; Liu, W.; Zhang, Z.; Li, Sh.; Liu, H.; Hua, R. Sorption of rhenium on synthetic cyclohexylamine anion exchange resin LSC-436. *Appl. Polym. Sci.* **2022**, 139, 23, DOI:10.1002/app.52315
13. Kołczyk-Siedlecka, K.; Socha, R. P.; Yang, X.; Eckert, K.; Wojnicki. M. Study on kinetics and mechanisms of re (VII) ion adsorption and desorption using commercially available activated carbon and solutions containing se (VI) as an impurity. *Hydrometallurgy* **2023**, 215, 105973, DOI:10.1016/j.hydromet.2022.105973
14. Rudenko, A.A.; Troshkina, I.D.; Danilevko, V.V.; Barabanov, O.S.; Vatsura, F.Ya. Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit. *Min. Sci. Technol.* **2021**. 6(3), 158-169, DOI:10.17073/2500-0632-2021-3-158-169
15. Targanov, I.Ye; Bardysh, A.B.; Troshkina, I. D. Sorption of rhenium from mother cobalt-nickel solutions of complex waste processing. *Russ. J. Appl. Chem.* **2022**, 95 (11–12), 1439–1447, DOI:10.31857/S0044461822110081
16. Sharafutdinov, U. Z.; Halimov, I.U.; Khamidov, S.B.; Karimov, N.M. Use of carbon adsorbents for rhenium sorption from uranium re-extracts. *Tsvetnye Met.* **2023**, 12. 51-56, DOI:10.17580/tsm.2023.12.04
17. Li, J.; Zhang, Y.; Zhou, Y. Fang, F.; Li, X. Tailored metal-organic frameworks facilitate the simultaneously high-efficient sorption of UO₂²⁺ and ReO₄[–] in water. *Sci. Total Environ.* **2021**, 799, 149468, DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.149468
18. Jumadilov, T.; Khimersen, K.; Haponiuk, J.; Totkhuskyzy, B. Enhanced Lutetium Ion Sorption from Aqueous Solutions Using Activated Ion Exchangers. *Polymers* **2024**, 16, 220, DOI:10.3390/polym16020220
19. Imangazy, A.; Jumadilov, T.; Khimersen, K.; Bayshibekov, A. Enhanced Sorption of Europium and Scandium Ions from Nitrate Solutions by Remotely Activated Ion Exchangers. *Polymers* **2023**, 15, 1194, DOI:10.3390/polym15051194
20. Jumadilov, T.; Utesheva, A.; Grazulevicius, J.; Imangazy, A. Selective Sorption of Cerium Ions from Uranium-Containing Solutions by Remotely Activated Ion Exchangers. *Polymers* **2023**, 15, 816, DOI:10.3390/polym15040816

SUSTAINABLE DYNAMIC POLYMER NETWORKS FOR PACKAGING: DEVELOPMENT AND PROSPECTS OF BIO-BASED VITRIMERS

A.K. Baidullayeva^{1,2,3*}, R.N. Tuleyeva^{2,4,5}, M. Mussalimova², A. Taubatyrova²,
G. Toleutay^{2,6}, N.A. Bektenov¹

¹Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Medical University named after S.D. Asfendiyarov, Almaty, Kazakhstan

⁴Research Institute of Advanced Materials, Almaty, Kazakhstan

⁵Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

⁶University of Tennessee, Knoxville, USA

*Corresponding author e-mail: ainasha.kz@list.ru

Abstract. *Introduction.* The development of biodegradable and recyclable polymer materials is a key priority in the context of the global environmental crisis and the growing accumulation of plastic waste. In recent years, a new class of materials-vitrimer-have been attracting significant interest due to their unique combination of thermoset-like mechanical strength and reprocess ability enabled by dynamic covalent bonding. *Objective of the study.* This review article presents current approaches to the synthesis and application of bio-based vitrimers, primarily derived from epoxidized vegetable oils (EVO). *Results and Discussion.* Chemical strategies for creating polymer networks are studied in detail, including transesterification mechanisms, catalyst selection, and crosslink density control. The potential for structural modification using natural additives such as cellulose and lignin is discussed with the aim of enhancing mechanical, barrier, and antioxidant properties. Particular attention is given to the functional performance of these materials, including thermal resistance, moisture stability, mechanical robustness, self-healing capacity, and biodegradability. Recent research highlights the potential of this eco polymers for practical implementation as packaging materials for various applications, including food, pharmaceutical, and active packaging systems with biofunctional barrier properties. *Conclusions.* Special emphasis is placed on the scalability of synthesis processes, durability under real-world conditions, and environmental safety.

Keywords. bio-based vitrimers, epoxidized vegetable oils, dynamic covalent bonds, transesterification, biodegradable packaging, cellulose, lignin, thermosetting polymers, sustainable materials, recyclability, functional polymers.

Baidullayeva Ainash Kairatovna	PhD candidate; E-mail: ainasha.kz@list.ru
Tuleyeva Rysgul Nurlanovna	PhD candidate; E-mail: rysghtuleyeva@gmail.com
Mussalimova Madina	PhD candidate; Email: mmussalimova@bk.ru
Taubatyrova Anel	Master; Email: 0ani.lani9@gmail.com
Gaukhar Toleutay	PhD; Email: gaukhar.toeutay@gmail.com
Bektenov Nesipkhan Abzhaparovich	Professor, Doctor of chemical sciences; Email: bektenbna@gmail.com

Citation: Baidullayeva A.K., Tuleyeva R.N., Mussalimova M., Taubatyrova A., Toleutay G., Bektenov N.A. Sustainable dynamic polymer networks for packaging: development and prospects of bio-based vitrimers (Review). *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 87-106. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.53>

Introduction

The accumulation of non-degradable plastic waste in global and aquatic ecosystems pose a serious risk to environmental sustainability and human health. Conventional thermosetting and thermoplastic polymers, widely used in packaging, construction, and consumer goods, are primarily synthesized from non-renewable petrochemical feedstocks and exhibit resistance to biological degradation and recycling. As of 2023, the worldwide annual production of plastics exceeds 390 million tons, with packaging accounting for more than 40% of total plastic waste [1, 2]. This situation has stimulated an active search for sustainable alternatives based on biodegradable and recyclable polymer systems for packaging applications.

Among the recent innovations, vitrimers - a class of polymer networks with dynamic covalent bonds - have attracted particular attention. These materials combine the mechanical strength and thermal resistance of traditional thermosets with recyclability and self-healing capabilities due to structural rearrangements under external stimuli [3–5]. Unlike conventional crosslinked materials, vitrimers possess the ability to undergo reversible topological rearrangements through bond-exchange reactions, such as transesterification, imine exchange, or disulfide bond exchange [6].

Current research trends focus on the development of bio-based vitrimers derived from renewable resources, including epoxidized plant oils (EPO), bioacids, polyesters, and natural polymers such as cellulose, lignin, and starch [7,8]. Epoxidized oils - including soybean (ESO), linseed (ELO), and castor oils (ECO) - are particularly attractive as building blocks due to their availability, low toxicity, and high reactivity under dynamic crosslinking conditions [9]. Owing to their biodegradability, flexibility for modification γ (via epoxidation, glycidylation, etc.), these oils serve as suitable platforms for the synthesis of next-generation biomaterials [10–12].

Thermally stable, recyclable, and partially biodegradable polymeric materials based on vitrimer chemistry have attracted increasing attention for applications in packaging, coatings, adhesives, and composites, with a growing body of research since the introduction of the vitrimer concept [13–15]. Research is focused on improving their mechanical, thermal, and dynamic properties, as well as expanding their application areas - including packaging, biomedical materials, self-healing coatings, and biodegradable composites [16–18].

A key feature of such systems is their tunability in terms of composition and structure: for example, the use of acids with varying functionality allows control over network density, relaxation dynamics, glass transition temperature, and biodegradability [19–21]. Simultaneously, there is increasing interest in systems with additional functional properties, including self-healing ability, shape-memory behavior, recyclability, and adaptive response to external stimuli. These features are enabled by the presence of dynamic bonds in the polymer structure - including boronic esters, disulfides, imines, and others.

The incorporation of natural polymers (such as nanocellulose and lignin) significantly enhances the mechanical strength, barrier properties, and UV resistance of vitrimer systems [22, 23]. Hybrid materials derived from bio-based sources hold great potential for the development of active packaging with antioxidant, antimicrobial, and controlled biodegradation properties [24]. Moreover, such materials have the potential to meet modern international standards for environmental safety, biodegradability, and recyclability [25, 26].

Despite the progress made, certain challenges remain. These include component compatibility, especially when combining natural fillers with synthetic matrices; retention of properties after multiple recycling cycles; scalability of synthesis; and the lack of standardized protocols for assessing durability and recyclability [27].

The purpose of this review is to systematize current knowledge on vitrimers, with a focus on their synthesis, physicochemical properties, potential for sustainable packaging solutions, and prospects for industrial implementation. Particular attention is given to systems based on transesterification of epoxidized oils and structural modification using cellulose and lignin.

Structural Features and Classification of Vitrimers.

Vitrimers represent a class of polymeric materials that combine the characteristics of thermosetting and thermoplastic systems through the incorporation of dynamically exchangeable covalent bonds into the polymer network. The key feature of vitrimers lies in the ability of their three-dimensional polymer networks to undergo topological rearrangements without loss of crosslinking, enabled by associative bond-exchange reactions such as transesterification, disulfide exchange, imine exchange, and urethane bond exchange [28–30].

Morphologically, vitrimers are classified as post-crosslinked network materials in which dynamic nodes enable reprocessing, self-healing, and stress relaxation at elevated temperatures while maintaining structural integrity under ambient conditions. Observed properties distinguish vitrimers from thermoplastics (which lack network structures) and conventional thermosets (which lack reversible rearrangement capability) [31, 32].

The structural basis of vitrimers relies on dynamically associative bond-exchange reactions that balance covalent stability with reversibility. The most common mechanism involves catalyzed transesterification between hydroxyl and ester groups, as found in systems derived from epoxidized plant oils and multifunctional organic acids [33,34].

Several subclasses of vitrimers can be distinguished based on the type of exchange mechanism: Ester-based vitrimers (the most extensively studied), where the primary mechanism is transesterification; Disulfide-based vitrimers, which rely on reversible exchange between S–S bonds; Imine-, boronic ester-, and urethane-based vitrimers, which utilize less common reversible exchange reactions. The functional properties of vitrimers - including activation

temperature, viscoelasticity, self-healing efficiency, and solvent resistance — are closely related to the type and density of dynamic bonds, the presence of catalysts, the degree of crosslinking, and the chemical nature of the polymer matrix [35–38].

Contemporary research focuses on the biotechnological adaptation of vitrimer systems by replacing petrochemical components with bio-based alternatives such as epoxidized plant oils, plant-derived polyols, and natural acids including citric, succinic, and tartaric acids [39]. These materials offer not only resistance to thermo-oxidative degradation but also meet key criteria for biodegradability and compatibility with food and biomedical applications.

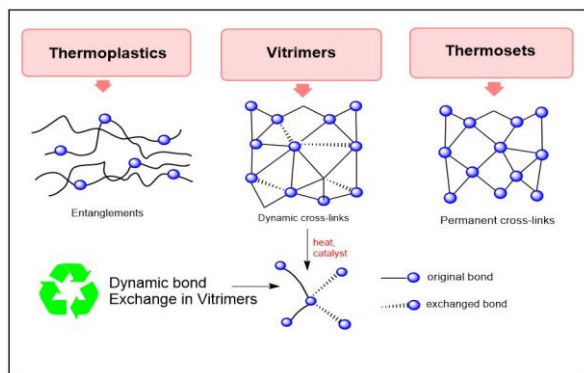


Figure 1 – Schematic comparison of the network topology of thermoplastics, thermosetting polymers, and vitrimers.

The structural features of vitrimers are determined not only by the type of covalent bonds but also by their spatial distribution within the polymer matrix. Figure 1 illustrates a comparative topology of thermoplastics, thermosets, and vitrimers, along with the mechanism of bond exchange in the presence of a catalyst. Table 1 summarizes the key differences between these classes of polymer materials in terms of process ability, thermal resistance, and the presence of dynamic bonding mechanisms.

Table 1– Comparison of Main Types of Polymeric Systems

Characteristic	Thermoplastics	Thermosets	Vitrimers
Type of Bonds	Secondary (physical)	Covalent (permanent)	Covalent (dynamic)
Recyclability	Yes	No	Yes (upon heating)
Self-Healing Ability	No	No	Possible
Processing Temperature	Moderate	High	Moderate/High
Solvent Resistance	Moderate	High	High
Dynamic Bonds	No	No	Yes

A promising strategy also involves the development of hybrid vitrimers containing natural modifiers (such as cellulose and lignin), which enhance mechanical and barrier properties while providing adhesion, antioxidant activity, and biocompatibility [40,41].

Renewable Components for Vitrimer Networks: Epoxidized Oils, Polyesters, and Organic Acids

The development of bio-based vitrimers requires the selection of efficient monomers and crosslinking agents that not only exhibit high reactivity but also align with the principles of sustainable development. In this context, epoxidized vegetable oils, polyesters, and organic acids derived from renewable sources are of particular interest. Such components play a key role in the formation of dynamically crosslinked networks with recyclability, self-healing capabilities, and adaptive behavior.

Epoxidized vegetable oils (EVOs), particularly ESO, ELO, and ECO, are widely used as low-toxicity, modifiable epoxy monomers in vitrimer synthesis due to their reactive oxirane groups, with studies demonstrating their effective crosslinking with natural acids, thermal resistance, and recyclability enhanced by catalysts such as $\text{Zn}(\text{acac})_2$ or TBAB [42–46]. Bio-based polyesters such as poly(butylene succinate) (PBS), polylactic acid (PLA), and poly(ethylene adipate) are actively used as elastomeric matrices or soft segments in vitrimer systems. These materials offer a high degree of biodegradability and good compatibility with epoxidized vegetable oils, allowing for the tuning of flexibility and mechanical strength. Polylactic acid can be functionalized with epoxy groups or incorporated into formulations as a reactive polyester [47–49]. Figure 2 illustrates examples of multifunctional organic acids used in the transesterification reactions for synthesizing substances from epoxidized plant oils. These include citric, tartaric, succinic, sebacic, maleic, and other acids, each contributing distinct properties to the resulting networks.

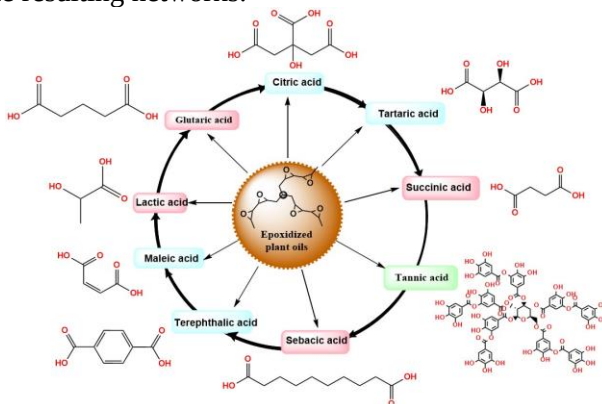


Figure 2 – Examples of monomers used in the transesterification reaction to obtain some bio-based vitrimers.

Multifunctional organic acids act as crosslinking agents due to their multiple carboxylic groups. They readily undergo transesterification with epoxide groups, forming dynamic covalent networks that are both elastic and recyclable. The choice of acid affects key material properties, such as crosslinking density, glass transition temperature (T_g), stiffness, and biodegradability. For instance, citric acid leads to denser networks, enhancing rigidity, whereas sebacic acid contributes to greater flexibility and elasticity [50–53].

There is also increasing interest in using aromatic bioacids (e.g., vanillic acid, ferulic acid) to impart antioxidant and UV-barrier properties as well as to improve thermal stability [54]. Table 2 presents a comparative overview of the key renewable components used in vitrimer systems.

Table 2 – Characteristics and Functions of Renewable Components for Vitrimers

Component	Chemical Nature	Role in Vitrimer Network	Application Features
Epoxidized Soybean Oil	Aliphatic epoxy compound	Primary epoxy monomer	Widely studied in bio-based vitrimer systems
Epoxidized Linseed Oil	Multifunctional epoxy	Crosslinking accelerator, high network density	Fast transesterification reactivity
Epoxidized Castor Oil	Hydroxy-functional epoxy	Elasticity, additional functionality	Compatible with polyesters and acids
Poly (butylene succinate)	Aliphatic polyester	Flexibility, biodegradability	Blended with ESO in hybrid systems
Poly (lactic acid)	α -Hydroxy acid-based polyester	Reinforcement, miscibility with EVOs	Transparency, biodegradability
Citric Acid	Tricarboxylic acid	Crosslinking agent, high network density	Commonly used in food packaging applications
Tartaric Acid	Dicarboxylic hydroxy acid	T_g enhancement, hydrophilicity	Provides rigidity and thermal stability
Succinic Acid	Aliphatic dicarboxylic acid	Flexibility, crosslinking, biodegradability	Low toxicity, high reactivity
Sebacic Acid	Long-chain aliphatic acid	Plasticity, thermal resistance	Increases elasticity without toxicity
Vanillic Acid	Aromatic acid with phenolic group	Antioxidant, thermal stabilizer	Imparts bioactivity and UV protection

Transesterification Mechanisms and Dynamic Bond Exchange

Transesterification, a key mechanism in vitrimer networks based on epoxidized vegetable oils, enables dynamic bond exchange between hydroxyl and carboxyl groups, with catalysts such as $\text{Zn}(\text{acac})_2$, TBD, or triazabicyclo[4.4.0]dec-5-ene significantly enhancing stress relaxation and thermal reprocess ability, as demonstrated in systems using epoxidized soybean oil and glucuronic acid [55–56]. The transesterification mechanism in vitrimers is based on associative exchange, where a new bond is formed before the original one is broken. This contrasts with dissociative mechanisms and ensures structural continuity within the polymer network. As a result, this mechanism supports the retention of thermal resistance and mechanical strength while enabling reprocess ability and self-healing.

In addition to transesterification, other types of exchange reactions are also utilized in vitrimer systems, including: Disulfide bond exchange, which provides rapid response at moderate temperatures and is applicable in systems with aromatic or aliphatic diphenyl disulfides [57]; Imine and boronic ester exchanges, offering specific responses to moisture, acids, or bases [58]; Urethane bond exchange, which requires higher temperatures but provides enhanced strength and thermal stability [59]. Depending on the chemical composition and the nature of functional groups, these exchange reactions can vary significantly in terms of kinetics, reversibility, and activation energies, allowing for precise tuning of vitrimer properties.

The incorporation of multiple dynamic bond types within a single system enables the development of multifunctional vitrimers with enhanced performance. For instance, the combination of transesterification and disulfide exchange can yield materials that are simultaneously reprocess able and self-healing under different thermal regimes [60].

As a result, the control of dynamic bond exchange mechanisms is a critical element in the design of bio-based vitrimers with targeted functional properties. Mechanisms of this type provide the foundation for developing sustainable next-generation polymers suitable for applications in packaging, healthcare, construction, and other industrial sectors.

Representative Formulations and Experimental Approaches

Developing of bio-based vitrimer systems requires the rational selection of starting monomers, crosslinking agents, catalysts, and functional additives to obtain polymer networks with targeted physicochemical properties. For instance, ESO contains approximately 4.5 to 6.0 epoxy groups per molecule, exhibits high reactivity, and is commercially available on an industrial scale. In contrast, ELO has a higher degree of epoxidation, which contributes to the formation of more rigid and thermally resistant networks, while castor oil, containing natural hydroxyl groups, can be used either in its native or modified form to impart additional flexibility [61–63].

Crosslinking agents are typically natural di- or polycarboxylic acids. The most frequently used acids include TA, CA, SA, and GA. Such acids undergo transesterification reactions with epoxy groups in the oils, forming ester linkages and enabling dynamic reprocessing. To achieve optimal crosslinking, a molar ratio of functional groups (COOH : epoxy) close to 1:1 is commonly established [64–66].

Reinforcement with biopolymers-such as nanocellulose (CNF, CNC) and lignin (organosolv or alkali types) - is typically carried out prior to crosslinking. Nanocellulose enhances mechanical strength and barrier properties, while lignin contributes antioxidant activity and UV resistance to the final formulation [67, 68]. These experimental approaches confirm the feasibility of creating sustainable and functional vitrimers with tailored performance characteristics.

Functional Role of Cellulose and Lignin in Vitrimer Systems

The incorporation of natural polymers such as cellulose and lignin into bio-based vitrimer formulations significantly enhances their functional performance. These components are not only biocompatible and renewable, but also play a critical role in modifying the structure, mechanical behavior, and stability of the resulting materials.

Cellulose and its Derivatives. Cellulose, including its nanostructured forms (CNC and CNF), is widely used as a reinforcing agent. Due to its high modulus, large specific surface area, and capacity for hydrogen bonding, cellulose contributes to enhanced mechanical strength improved thermal stability; reduced oxygen and moisture permeability through tighter packing in the polymer network; improved environmental safety, as it does not negatively affect the composite's toxicological profile.

Cellulose and lignin play crucial roles in enhancing the structural and functional properties of epoxy vitrimer systems based on epoxidized plant oils. Hydroxyl groups in cellulose actively participate in dynamic network rearrangement via hydrogen bonding and covalent interactions with residual epoxy or carboxyl functionalities. For instance, the incorporation of 3 wt.% cellulose nanofibers (CNF) into an ESO/citric acid vitrimer matrix led to a 40% reduction in water absorption and a 28% increase in elastic modulus, confirming its barrier and reinforcing effects [69–70].

Lignin enhances vitrimer systems by providing UV shielding, antioxidant and thermal stabilization, and by forming covalent and dynamic crosslinks through its phenolic and carboxylic groups, as shown in ESO/succinic acid/lignin composites with improved tensile strength and Tg elevation [71–72].

Figure 3 illustrates the sustainable development of epoxy vitrimers from biomass-derived feedstocks (e.g., straw, corn, wood, and lignin) and highlights the contribution of cellulose and lignin to key properties such as reprocess ability, self-healing, UV resistance, and moisture barrier.

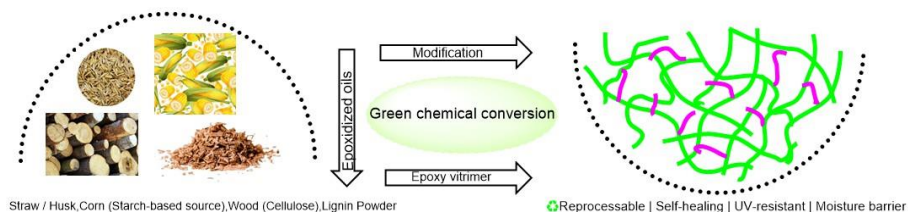


Figure 3 – Functional contribution of cellulose and lignin in epoxy vitrimer systems derived from biomass and epoxidized plant oils.

Physicochemical Properties and Functional Characteristics of Bio-Based Vitrimers

Bio-based vitrimers represent a class of dynamic polymer networks that uniquely combine the rigidity and strength of thermosets with the adaptability of reversible covalent chemistry. These materials exhibit a complex interplay between chemical composition, network architecture, and dynamic exchange reactions, allowing for the modulation of key performance parameters relevant to advanced material design. In particular, systems based on epoxidized plant oils and multifunctional organic acids demonstrate promising physicochemical characteristics aligned with the principles of sustainable development.

Mechanical robustness remains one of the critical properties defining the application potential of vitrimers. Through precise adjustment of the crosslinking density and strategic incorporation of reinforcing fillers, such as nanocellulose, it is possible to tailor tensile strength and elasticity. For instance, in an ESO-based matrix crosslinked with citric acid, the addition of 3 wt. percentage cellulose nanofibers resulted in a 28% increase in elastic modulus due to the formation of an extensive hydrogen-bonding network between the filler and the polymer matrix [73]. Such formulations provide not only structural reinforcement but also dimensional stability under stress.

Thermal properties of vitrimers, specifically the glass transition temperature (T_g) and thermal degradation onset, are strongly dependent on the chemical nature of the acid crosslinkers and catalysts employed. In systems utilizing $\text{Zn}(\text{acac})_2$ as a catalyst, T_g values can reach 60–65 °C. Further enhancement is achieved through the introduction of polyester segments or rigid aromatic diacids such as ferulic or vanillic acid, enabling the elevation of T_g to approximately 80 °C while simultaneously improving resistance to thermal oxidation and UV degradation [74, 75]. These findings emphasize the potential of structural modification for the creation of thermally stable and environmentally resilient polymer networks.

One of the biggest advantages of vitrimeric systems lies in their intrinsic ability to undergo topological rearrangements under thermal activation, endowing them with a self-healing function. Dynamic transesterification is responsible for this phenomenon, as ester groups are capable of incessant exchange when subjected to appropriate environments. Reports indicate that complete self-healing of mechanical damage can be achieved within 30 minutes at 150 °C, without significant loss of mechanical integrity, making such materials highly attractive for protective coatings and packaging systems with prolonged service life [76].

Equally important is the reprocess ability of vitrimers, which arises from the associative mechanism of bond exchange that preserves crosslink density during reconfiguration. The inclusion of organic catalysts such as TBD or imidazole dramatically lowers the energy barrier for exchange reactions, allowing for effective reprocessing at moderate temperatures below 180 °C [77]. This feature offers a pathway toward the circular utilization of polymeric materials and aligns with the objectives of sustainable manufacturing practices.

In barrier-critical packaging, cellulose nanofillers improve moisture resistance by reducing permeability, while PLA–ESO composites show 60% biodegradation in 90 days. Integrating transesterification and disulfide exchange enables dual-responsive networks with self-healing, enhanced creep resistance, and durability, supporting versatile applications across various industries [78-80].

Such multifunctional networks offer new avenues for designing adaptive materials with customizable properties for diverse industrial sectors.

Applications of Bio-Based Vitrimers in Packaging and Environmental Considerations

The tightening of international standards and increasing public demand for reducing plastic pollution drives the growing interest in environmentally friendly and functional packaging materials. Contemporary research is focused on the development of sustainable polymer systems that meet the requirements of biodegradability, recyclability, and carbon footprint reduction. In this context, bio-based vitrimers featuring dynamic covalent bonds demonstrate significant potential as innovative materials for packaging applications.

One of the key advantages of vitrimers derived from epoxidized vegetable oils and bio-organic acids is their reprocessability and self-healing capability, while maintaining high thermal and mechanical stability. These properties are particularly valuable in packaging production, where materials must retain form and barrier functionality under varying conditions of storage, transportation, and recycling. Transesterification-based networks, as demonstrated in experiments, remain stable at temperatures up to 250–280 °C and exhibit effective healing after damage upon heating [81].

Vitrimer composites containing lignin and nanocellulose exhibit enhanced barrier properties and maintain recyclability. Dynamic matrices ensure fixation and release of antioxidant and antimicrobial agents under humidity or heat [84]. Trials in China, the US, and EU demonstrate effectiveness in packaging for meat, dry goods, and electronics [82-85]. A crucial stage in the development of biodegradable packaging is Life Cycle Assessment (LCA). Modern LCA studies on vitrimers report a 30–60% reduction in carbon footprint compared to PET or PP counterparts, while maintaining strength and recyclability. Particularly favorable LCA profiles have been found for systems based on ELO or castor oil, sourced from non-food and rapidly renewable resources [86].

The successful use of polymers depends on disposal strategies and infrastructure. Some require industrial composting or pre-shredding. Hybrid systems, such as vitrimer–PLA composites or paper laminates, enhance degradability. Reusable and repairable packaging concepts are gaining traction. EU initiatives are promoting certification and circular bioplastics standards. Bio-based vitrimers demonstrate strong alignment with the evolving demands of the modern packaging industry—encompassing functionality, safety, recyclability, and environmental responsibility. Their full life cycle and functional circularity

are illustrated in Figure 4a and 4b, highlighting their promise in sustainable packaging.

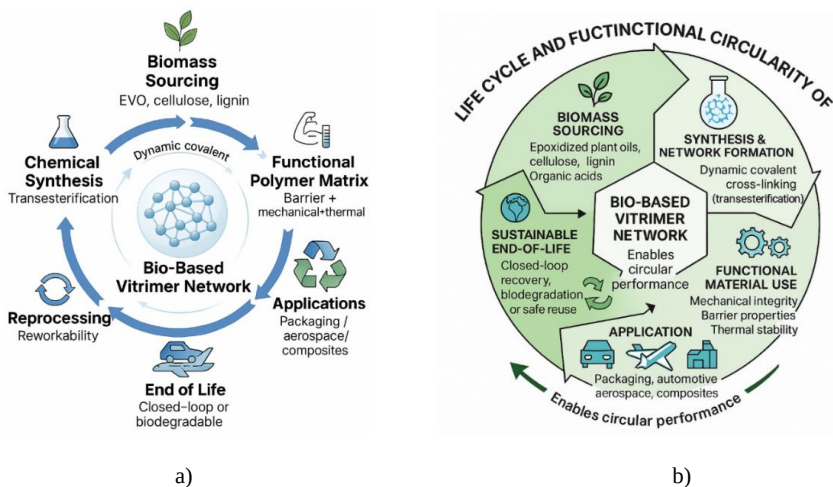


Figure 4 – a) Circular development cycle of bio-based vitrimers showing stages from biomass sourcing to end-of-life reuse or biodegradation; b) Functional circularity of bio-based vitrimers including synthesis, application, and sustainable material recovery.

Prospects for the Development of Bio-Based Vitrimers

Recent advances in bio-based vitrimer research highlight progress toward sustainable, reprocess able polymers, with future directions focused on raw material diversification, multifunctional architectures, industrial scalability, and circular integration, as demonstrated by catalyst-free, flame-resistant systems [87] and multifunctional vitrimers based on glycyrrhizic acid and ESO with self-healing and shape-memory properties [88].

Recyclability of fiber-reinforced composites remains a critical challenge. Researchers have developed carbon fiber composites based on ESO that can be fully reprocessed without compromising mechanical performance, opening opportunities for the transportation and aerospace sectors [89]. Such systems require a balance between structural stability and reversibility, achieved by precisely tuning the density of dynamic bonds.

Another innovative direction is the synthesis of vitrimers containing multiple types of dynamic bonds (e.g., disulfide, ester, and urethane), enabling unique property profiles. A recent review describes an epoxy vitrimer with both acetal and disulfide linkages, resulting in high strength, reprocess ability, and degradability — ideal for biodegradable packaging systems [90].

Scalability and standardization are key goals in polymer network development. A kinetic study of epoxy-based dynamic systems aids large-scale production planning. In sustainable 3D printing, a tartaric acid-based photopolymer vitrimer shows strong performance and eco-benefits over acrylates.

Life cycle analyses confirm biosystems' role in lowering energy use and ensuring safe disposal. Additionally, incorporating ESO into starch/PBAT blends boosts biodegradability to 78.5% in 120 days while enhancing strength, supporting its use in green packaging [91-94].

Growing interest in smart packaging has led to the development of bio-based vitrimer systems with adaptive properties, such as castor oil-based photo-responsive networks for self-healing and pharmaceutical applications [95], and universal soybean oil-based epoxy resins with high adhesion and film-forming capabilities for eco-friendly coatings and packaging supported by sustainability initiatives in China [96]. Future development of bio-based vitrimers lies in the creation of multifunctional, adaptive, scalable, and environmentally safe materials. Their applications extend beyond packaging to include electronics, biomedicine, transportation, and construction. However, industrialization will require continued work on property standardization, long-term durability, economic efficiency, and sustainable life-cycle performance.

Conclusion

The development of bio-based vitrimers represents a vital direction in the creation of sustainable and functional polymeric materials. Due to the presence of reversible covalent bonds, these systems combine reprocess ability, thermal stability, self-healing, weldability, and controlled biodegradability. This makes them particularly promising for applications in smart packaging, medical devices, and other areas where both environmental safety and high performance are required.

Integrating vitrimers into the framework of a circular economy necessitates an interdisciplinary approach that includes renewable-resource-based synthesis, life cycle assessment, process standardization, and compliance with environmental regulations. The use of epoxidized vegetable oils, bio-acids, and natural modifiers enables a high level of sustainability and functionality without compromising the mechanical integrity of the materials.

Overall, vitrimers represent a promising direction in sustainable materials science, and Kazakhstan holds significant potential for advancing this area in the coming years, provided there is strategic scientific and institutional support. The relevance of further research lies in the potential of these materials to be adapted to local resources, scaled up for industrial use, and aligned with international sustainable development standards.

Acknowledgments: The Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, within the framework of the grant project, funded this research No. **BR27199103**: «Development of Eco-Friendly Packaging Materials from Recyclable Paper and Biomass Waste with Adaptive and Enhanced Protective Properties».

Conflict of interests: The authors declare that there are no conflicts of interest between the authors that require disclosure in this article.

ОРАМАЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРҒА АРНАЛҒАН БИОНЕГІЗДІ ВИТРИМЕРЛЕР: ТҰРАҚТЫ ДИНАМИКАЛЫҚ ПОЛИМЕРЛІК ТОРЛАРДЫ ҚҰРУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

**А.К. Байдуллаева^{1,2,3*}, Р.Н. Тулеева^{2,4,5}, М.Муссалимова²,
А.Таубатырова², Г. Толеутай^{2,5}, Н.А. Бектенов¹**

¹Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан

²Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан

³С.Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті, Алматы, Қазақстан

⁴Алдыңғы қатарлы материалдар ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

⁵Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

⁶Теннесси Университеті, Ноксвилл, АҚШ

Түйіндеме. *Кіріспе.* Биоыдырайтын және қайта өңдеуге жарамды полимерлі материалдарды әзірлеу – жаһандық экологиялық дағдарыс пен пластикалық қалдықтардың жиналуына байланысты өзекті мәселелердің бірі. Соңғы жылдары витримелер деп аталатын жаңа материалдар класы термореактивті полимерлерге тән механикалық беріктік пен динамикалық ковалентті байланыстар арқылы қайта өңделу қабілетінің бірегей үйлесімі арқасында үлкен қызығушылық тудыруда. *Зерттеу мақсаты.* Бұл шолу мақалада негізінен эпоксидтелген өсімдік майларынан алынған бионегізді витримерлерді синтездеу мен қолданудың қазіргі тәсілдері қарастырылады. *Нәтижелер мен талқылау.* Полимерлі торларды құруға арналған химиялық стратегиялар, соның ішінде трансэтерификация механизмдері, катализаторларды таңдау және торлану тығыздығын басқару егжей-тегжейлі талданады. Целлюлоза мен лигнин сияқты табиғи қоспаларды қолдану арқылы механикалық, барьерлік және антиоксиданттық қасиеттерді арттыру әлеуеті қарастырылады. Бұл материалдардың жылу тұрақтылығы, ылғалға төзімділігі, механикалық беріктігі, өздігінен қалпына келу қабілеті және биоыдырауы сияқты функционалдық сипаттамаларына ерекше назар аударылады. Қазіргі зерттеулер бионегізді витримерлердің тағамдық, фармацевтикалық және биофункционалды барьерлік қасиеттері бар белсенді орамалар сияқты әртүрлі мақсаттар үшін практикалық қолдану әлеуетін көрсетеді. *Қорытынды.* Бұл шолу жаңартылатын шикізатқа негізделген витримерлерді әзірлеу мен қолдану саласындағы соңғы ғылыми жетістіктерді жинақтап, тұрақты даму мен ресурс үнемдеу технологиялары контекстіндегі одан арғы зерттеу бағыттарын анықтайды.

Түйінді сөздер: бионегізді витримерлер, эпоксидтелген өсімдік майлары, динамикалық коваленттік байланыстар, трансэтерификация, биоыдырайтын орама, целлюлоза, лигнин, термореактивті полимерлер, тұрақты материалдар, қайта өңдеуге жарамдылық, функционалдық полимерлер.

Байдуллаева Айнаш Қайратовна	<i>PhD докторанты</i>
Тулеева Рысғұль Нұрлановна	<i>PhD докторанты</i>
Муссалимова Мадина	<i>PhD докторанты</i>
Таубатырова Анель	<i>магистр</i>
Гаухар Толеутай	<i>PhD</i>
Бектенов Несипхан Абжапарович	<i>химия ғылымдарының докторы, профессор</i>

**УСТОЙЧИВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СЕТИ ДЛЯ УПАКОВКИ:
РАЗРАБОТКА И ПЕРСПЕКТИВЫ БИО-ОСНОВАННЫХ ВИТРИМЕРОВ**

А.К. Байдуллаева^{1,2,3*}, **Р.Н. Тулеева**^{2,4,5}, **М.Муссалимова**²,
А. Таубатырова², **Г.Толеутай**^{2,6}, **Н.А. Бектенов**¹

¹Институт химических наук им. А.Б. Бектурова, Алматы, Казахстан

²Сатбаев университет, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова,
Алматы, Казахстан

⁴Научно-Исследовательский Институт Перспективных Материалов, Алматы, Казахстан

⁵Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁶Университет Теннесси, Ноксвилл, США

Резюме. Введение. Разработка биоразлагаемых и пригодных к переработке полимерных материалов является ключевым приоритетом в условиях глобального экологического кризиса и растущего накопления пластиковых отходов. В последние годы значительный интерес вызывает новый класс материалов — витримеры — благодаря уникальному сочетанию механической прочности, присущей термореактивным полимерам, и возможности переработки, обеспечиваемой за счёт динамических ковалентных связей. **Цель исследования.** В данной обзорной статье представлены современные подходы к синтезу и применению биооснованных витримеров, полученных преимущественно из эпоксицированных растительных масел. **Результаты и обсуждение.** Подробно рассмотрены химические стратегии создания полимерных сетей, включая механизмы трансэтерификации, выбор катализаторов и контроль плотности сшивки. Обсуждается потенциал структурной модификации с использованием природных добавок, таких как целлюлоза и лигнин, с целью повышения механических, барьерных и антиоксидантных свойств. Особое внимание уделено функциональным характеристикам этих материалов, включая термическую стойкость, устойчивость к влаге, механическую прочность, способность к самовосстановлению и биоразлагаемость. Современные исследования подчеркивают потенциал биооснованных витримеров для практического применения в качестве упаковочных материалов для различных целей, включая пищевую, фармацевтическую и активную упаковку с биофункциональными барьерными свойствами. **Заключение.** Обзор обобщает актуальные научные достижения в области разработки и применения витримеров на основе возобновляемого сырья и определяет приоритетные направления для дальнейших исследований в контексте устойчивого развития и ресурсосберегающих технологий.

Ключевые слова: биооснованные витримеры, эпоксицированные растительные масла, динамические ковалентные связи, трансэтерификация, биоразлагаемая упаковка, целлюлоза, лигнин, термореактивные полимеры, устойчивые материалы, перерабатываемость, функциональные полимеры.

<i>Байдуллаева Айнаш Кайратовна</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Тулеева Рысгуль Нурлановна</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Муссалимова Мадина</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Таубатырова Анель</i>	<i>магистр</i>
<i>Толеутай Гаухар</i>	<i>PhD</i>
<i>Бектенов Несипхан Абжапарович</i>	<i>доктор химических наук, профессор</i>

References

- 1 Walker, T. R. and Fequet, L. Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **2023**. 160, 116984. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>
- 2 W. Denissen, G. Rivero, R. Nicolaÿ, L. Leibler, J.M. Winne, F.E. Du Prez. Vinylogous urethane vitrimers. *Adv. Funct. Mater.*, **2015**. 25 (16) pp. 2451-2457. <https://doi.org/10.1002/adfm.201404553>
- 3 Zhang W., Jin Y. (ed.). Dynamic covalent chemistry: principles, reactions, and applications. **2017**. <https://doi.org/10.1002/9781119075738.ch2>
- 4 Zheng, N., Xu, Y., Zhao, Q., & Xie, T. Dynamic covalent polymer networks: a molecular platform for designing functions beyond chemical recycling and self-healing. *Chemical Reviews*, **2021**. 121(3), 1716-1745. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00938>
- 5 Chen J. H. et al. Catalyst-free dynamic transesterification towards a high-performance and fire-safe epoxy vitrimer and its carbon fiber composite // *Green Chemistry*. **2022**. T. 24. №. 18. P. 6980-6988. <https://doi.org/10.1039/D2GC01405J>
- 6 Zhang, Y., Yukiko, E., & Tadahisa, I. Bio-based vitrimers from divanillic acid and epoxidized soybean oil. *RSC Sustainability*, **2023**. 1(3), 543-553. <https://doi.org/10.1039/d2su00140c>
- 7 Zhao X. L. et al. Biobased covalent adaptable networks: towards better sustainability of thermosets // *Green Chemistry*. **2022**. T.24. №.11. P. 4363-4387. <https://doi.org/10.1039/D2GC01325H>
- 8 Zhou, Y., Shi, K., Liu, G., Sun, H., Weng, Y. Epoxidized soybean oil toughened PLA/lignin-g-PLA biocomposite films // *Polymers*. **2024**. Vol. 16. No. 14. P. 2025. DOI: 10.3390/polym16142025
- 9 Li, N., Xiang, H. J., Hu, T. G., Qiu, W. P., Hong, Y. X., Huang, K. W., ... & Wen, P. Multifunctional electrospun nanofibrous film integrated with cinnamon essential oil emulsion stabilized by dealkali lignin for active packaging material. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2025**. 704, 135467. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135467>
- 10 Campanella, A., Bonnaillie, L. M., & Wool, R. P. Polyurethane foams from soyoil-based polyols. *Journal of Applied Polymer Science*, **2009**. 112(4), 2567-2578. <https://doi.org/10.1002/app.29898>
- 11 Wang, X., Huang, X., Ji, Z., Sheng, H., & Liu, H. Planting multiwalled carbon nanotubes onto epoxidized soybean oil-based vitrimer to construct a biobased photothermal superhydrophobic coating with self-healing and closed-loop recyclability for anti/deicing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2024**. 12(18), 7147-7157. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01475>
- 12 Li, Z. M., Li, X. L., Li, Y., Zhang, Y. H., Fu, T., Wang, X. L., & Wang, Y. Z. High-performance chemically recyclable multifunctional polyolefin-like biomass-derived polyester materials. *Materials Horizons*, **2025**. 12(3), 946-956. <https://doi.org/10.1039/D4MH01203H>
- 13 Shao, X., Xie, Y., Chen, A., Lan, L., Zhao, Q., Ma, L., ... & Hu, D. Sustainable lignocellulosic nanofibers-based films with sensitive humidity and pH response for UV-blocking food preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, **2025**. 309, 143115. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143115>
- 14 Fortman, D. J., Brutman, J. P., De Hoe, G. X., Snyder, R. L., Dichtel, W. R., & Hillmyer, M. A. Approaches to sustainable and continually recyclable cross-linked polymers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2018**. 6(9), 11145-11159. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02355>
- 15 Altuna, F. I., Pettarin, V., & Williams, R. J. Self-healable polymer networks based on the cross-linking of epoxidised soybean oil by an aqueous citric acid solution. *Green Chemistry*, **2013**. 15(12), 3360-3366. <https://doi.org/10.1039/C3GC41384E>
- 16 Zeng, Y., Li, J., Liu, S., & Yang, B. Rosin-based epoxy vitrimers with dynamic boronic ester bonds. *Polymers*, **2021**. 13(19), 3386. <https://doi.org/10.3390/polym13193386>
- 17 Sangaletti, D., Ceseracciu, L., Marini, L., Athanassiou, A., & Zych, A. Biobased boronic ester vitrimer resin from epoxidized linseed oil for recyclable carbon fiber composites. *Resources, Conservation and Recycling*, **2023**. 198, 107205. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107205>
- 18 Zhao, Y., Zhang, Y., Bai, X., Wang, Y., Li, Y., & Yang, S. Sustainable epoxy vitrimer materials with imine and disulfide bonds prepared from epoxidized soybean oils. *Industrial Crops and Products*, **2025**. 225, 120435. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120435>

- 19 Yue, H., Zhou, J., Huang, M., Hao, C., Hao, R., Dong, C., ... & Zhu, C. Recyclable, reconfigurable, thermadappt shape memory polythiourethane networks with multiple dynamic bonds for recycling of carbon fiber-reinforced composites. *Polymer*, **2021**. 237, 124358. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124358>
- 20 Perego, A., & Khabaz, F. Effect of bond exchange rate on dynamics and mechanics of vitrimers. *Journal of Polymer Science*, **2021**. 59(21), 2590-2602. <https://doi.org/10.1002/pol.20210411>
- 21 Li, P., Lan, B., Zhang, X., Lei, S., Yang, Q., Gong, P., ... & Li, G. Facile in situ construction of a covalent adaptable network polyester vitrimer with advanced performance in reparability, foamability and recyclability. *Green Chemistry*, **2022**. 24(14), 5490-5501. <https://doi.org/10.1039/D2GC01320G>
- 22 Kumar, S., Krishnan, S., & Prabakaran, K. Renewable resource-based epoxy vitrimer composites for future application: A comprehensive review. *ACS Sustainable Resource Management*, **2024**. 1(9), 2086-2107. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgmt.4c00200>
- 23 Fotie, G., Gazzotti, S., Ortenzi, M. A., & Piergiovanni, L. Implementation of high gas barrier laminated films based on cellulose nanocrystals for food flexible packaging. *Applied Sciences*, **2020**. 10(9), 3201. <https://doi.org/10.3390/app10093201>
- 24 Stewart, D. Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial crops and products*, **2008**. 27(2), 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.008>
- 25 Figueiredo, P., Lintinen, K., Hirvonen, J. T., Kostianinen, M. A., & Santos, H. A. Properties and chemical modifications of lignin: Towards lignin-based nanomaterials for biomedical applications. *Progress in Materials Science*, **2018**. 93, 233-269. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.001>
- 26 Zhang, W., Shen, J., Gao, P., Jiang, Q., & Xia, W. Sustainable chitosan films containing a betaine-based deep eutectic solvent and lignin: Physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties. *Food Hydrocolloids*, **2022**. 129, 107656. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107656>
- 27 Boarino, A., Schreier, A., Leterrier, Y., & Klok, H. A. Uniformly dispersed poly (lactic acid)-grafted lignin nanoparticles enhance antioxidant activity and UV-barrier properties of poly (lactic acid) packaging films. *ACS Applied Polymer Materials*, **2022**. 4(7), 4808-4817. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00420>
- 28 Denissen, W., Winne, J. M., & Du Prez, F. E. Vitrimers: permanent organic networks with glass-like fluidity. *Chemical science*, **2016**. 7(1), 30-38. <https://doi.org/10.1039/c5sc02223a>
- 29 Yanagisawa, Y., Nan, Y., Okuro, K., & Aida, T. Mechanically robust, readily repairable polymers via tailored noncovalent cross-linking. *Science*, **2018**. 359(6371), 72-76. <https://doi.org/10.1126/science.aam7588>
- 30 Montarnal, D., Capelot, M., Tournilhac, F., & Leibler, L. Silica-like malleable materials from permanent organic networks. *Science*, **2011**. 334(6058), 965-968. <https://doi.org/10.1126/science.1212648>
- 31 Fortman, D. J., Snyder, R. L., Sheppard, D. T., & Dichtel, W. R. Rapidly reprocessable cross-linked polyhydroxyurethanes based on disulfide exchange. *ACS Macro Letters*, **(2018)**. 7(10), 1226-1231. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.8b00667>
- 32 Lü, Y. and Guan, Z. Olefin metathesis for effective polymer healing via dynamic exchange of strong carbon-carbon double bonds. *Journal of the American Chemical Society*, **2012**. 134(34), 14226-14231. <https://doi.org/10.1021/ja306287s>
- 33 Tang, D., Zhang, L., Zhang, X., Xu, L., Li, K., & Zhang, A. Bio-mimetic actuators of a photothermal-responsive vitrimer liquid crystal elastomer with robust, self-healing, shape memory, and reconfigurable properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2021**. 14(1), 1929-1939. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c19595>
- 34 Li, J., Ju, B., & Zhang, S. Catalyst-free, sustainable epoxy vitrimers from epoxidized soybean oil and natural sugar alcohols. *Industrial Crops and Products*, **2023**. 205, 117466. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117466>
- 35 Tang Guohong, Zhao Zhen, Zhong Jiahui, Xu Xiaoling, Sun Yinglu, Sheng Dekun, & Yang Yuming. Research progress on the preparation and properties of bio-based polyurethanes from amino acids and their derivatives. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, **2025**. 42 (1). <https://doi.org/10.19894/j.issn.1000-0518.240294>
- 36 Winne, J. M., Leibler, L., & Prez, F. D. Dynamic covalent chemistry in polymer networks: a mechanistic perspective. *Polymer Chemistry*, **2019**. 10(45), 6091-6108. <https://doi.org/10.1039/c9py01260e>

- 37 Azcune, I. and Odriozola, I. Aromatic disulfide crosslinks in polymer systems: self-healing, reprocessability, recyclability and more. *European Polymer Journal*, **2016**. 84, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.09.023>
- 38 Zhang, Y., Ma, F., Shi, L., Lyu, B., & Ma, J. Recyclable, repairable and malleable bio-based epoxy vitrimers: overview and future prospects. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, **2023**. 39, 100726. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100726>
- 39 Zhang, W., Wu, J., Gao, L., Zhang, B., Jiang, J., & Hu, J. Recyclable, reprocessable, self-adhered and repairable carbon fiber reinforced polymers using full biobased matrices from camphoric acid and epoxidized soybean oil. *Green Chemistry*, **2021**. 23(7), 2763-2772. <https://doi.org/10.1039/d1gc00648g>
- 40 Haider, T., Völker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. Plastics of the future? the impact of biodegradable polymers on the environment and on society. *Angewandte Chemie International Edition*, **2018**. 58(1), 50-62. <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- 41 Yang, Y., Zhou, H., Chen, X., Liu, T., Zheng, Y., Dai, L., ... & Si, C. Green and ultrastrong polyphenol lignin-based vitrimer adhesive with photothermal conversion property, wide temperature adaptability, and solvent resistance. *Chemical Engineering Journal*, **2023**. 477, 147216. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147216>
- 42 Mariani, A. and Malucelli, G. Biobased vitrimers: towards sustainability and circularity. *Chemical Communications*, **2025**. 61(11), 2173-2189. <https://doi.org/10.1039/d4cc05967k>
- 43 Bergoglio, M., Reisinger, D., Schlögl, S., Griebner, T., & Sangermano, M. Sustainable bio-based uv-cured epoxy vitrimer from castor oil. *Polymers*, **2023**. 15(4), 1024. <https://doi.org/10.3390/polym15041024>
- 44 Kumar, A. Sustainable Synthesis of Polymers. **2023**. <http://hdl.handle.net/1885/298270>
- 45 Omonov, T. S., Patel, V. R., & Curtis, J. M. Biobased thermosets from epoxidized linseed oil and its methyl esters. *ACS Applied Polymer Materials*, **2022**. 4(9), 6531-6542. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00926>
- 46 Patel, V. Synthesis of bioresins from plant oil epoxides. **2021**. <https://doi.org/10.7939/r3-d3by-q729>
- 47 Safarpour, M. Green and Biodegradable Thermosets and Vitrimers: Sustainable and Environmental Friendly Alternatives to Conventional Plastics for Sustainable Packaging. **2024**. 4(133). https://tesidottorato.depositolegale.it/bitstream/20.500.14242/104085/1/phdunige_4954468.pdf
- 48 Rodrigues, J. G. P., Arias, S., Pacheco, J. G. A., & Dias, M. L. Structure and thermal behavior of biobased vitrimer of lactic acid and epoxidized canola oil. *RSC Advances*, **2023**. 13(48), 33613-33624. <https://doi.org/10.1039/d3ra06272d>
- 49 Wei Ce, Chen Tianyu, Zhang Xiutao, Zhang Yiyao, Zhang Sibao, Zhang Xiaoyu, Huang Jing, Dong Weifu. Applications and future prospects dynamic covalent cross-linking networks in thermoplastic polymers, A review [J]. *China Plastics*, **2024**, 38(12): 8-18. <https://www.plaschina.com.cn/EN/Y2024/V38/I12/8>
- 50 Allasia, M., Estevez, V. G., Chesta, A. A., Baccifava, R., Gugliotta, L. M., Igarzabal, C. I. Á., ... & Minari, R. J. New insights into the properties of alkali-degradable thermosets based on epoxidized soy oil and plant-derived dicarboxylic acids. *Polymer*, **2021**. 232, 124143. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124143>
- 51 Poutrel, Q. A. Catalysed epoxy-sebacic acid vitrimers: cure kinetics and their potential for sustainability of crosslinked polymers (Doctoral dissertation, University of Manchester). **2021**. <https://core.ac.uk/download/pdf/492539913.pdf>
- 52 Liu, W., Chen, T., & Qiu, R. Soybean oil-based polymers and their composites. *Green Chemistry and Green Materials From Plant Oils and Natural Acids*, **2023**. 42-58. <https://doi.org/10.1039/bk9781837671595-00042>
- 53 Hu, Y., Dai, Y., Zhu, G., Ma, Y., Yuan, L., Tong, S., ... & Zhou, Y. A green and sustainable strategy for recyclable ultraviolet (uv)-curable resin from tartaric acid via three-dimensional (3d) printing to reduce plastic pollution. *Journal of Cleaner Production*, **2024**. 436, 140772. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140772>
- 54 Shen, M. Sustainable and degradable epoxy resins containing multifunctional biobased components. **2021**. <https://hdl.handle.net/10657/9410>

- 55 Ye, G., Huo, S., Wang, C., Zhang, Q., Wang, H., Song, P., ... & Liu, Z. Strong yet tough catalyst-free transesterification vitrimer with excellent fire-retardancy, durability, and closed-loop recyclability. *Small*, **2024**, 20(45). <https://doi.org/10.1002/smll.202404634>
- 56 Wu, J., Yu, X., Zhang, H., Guo, J., Hu, J., & Li, M. (2020). Fully biobased vitrimers from glycyrrhizic acid and soybean oil for self-healing, shape memory, weldable, and recyclable materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **8**(16), 6479-6487. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01047>
- 57 Liu, Y., He, J., Li, Y., Zhao, X., & Zeng, J. Biobased epoxy vitrimer from epoxidized soybean oil for reprocessable and recyclable carbon fiber reinforced composite. *Composites Communications*, **2020**, 22, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100445>
- 58 Gao, N., Zheng, Y., ShangGuan, J., Sun, H., Jiang, J., Xiang, S., ... & Liu, X. Superior epoxy vitrimer containing acetal and disulfide bonds for achieving high mechanical properties, reprocessability, and degradability. *Macromolecules*, **2024**, 57(11), 5450-5460. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.4c00734>
- 59 Veloso, A., Ruiz-Rubio, L., Yugueros, I., Moreno, I., Laza, J. M., & Vilas-Vilela, J. L. Improving the recyclability of an epoxy resin through the addition of new biobased vitrimer. *Polymers*, **2023**, 15(18), 3737. <https://doi.org/10.3390/polym15183737>
- 60 Zhou, J., Yue, H., Huang, M., Hao, C., He, S., Liu, H., ... & Wang, D. Arbitrarily reconfigurable and thermadaptable reversible two-way shape memory poly(thiourethane) accomplished by multiple dynamic covalent bonds. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2021**, 13(36), 43426-43437. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13057>
- 61 Zhao, X., Li, Y., & Zeng, J. Progress in the design and synthesis of biobased epoxy covalent adaptable networks. *Polymer Chemistry*, **2022**, 13(48), 6573-6588. <https://doi.org/10.1039/d2py01167k>
- 62 Zhang, Y., Zhang, S., Zhai, M., Wei, B., Lyu, B., & Liu, L. Self-healing and recyclable castor oil-based epoxy vitrimer based on dual dynamic bonds of disulfide and ester bonds. *ACS Applied Polymer Materials*, **2024**, 6(14), 8399-8408. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c01208>
- 63 Bobade, S. K., Paluvai, N. R., Mohanty, S., & Nayak, S. K. Bio-based thermosetting resins for future generation: a review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **2016**, 55(17), 1863-1896. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1185624>
- 64 Ma, Y., Hu, Y., Kou, Z., Zhang, M., Hu, L., Li, S., ... & Chu, F. Soybean oil-based random copolymers based on hydrogen bond crosslinked networks as reprocessable, recyclable and multifunctional adhesive materials. *Industrial Crops and Products*, **2024**, 209, 118048. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118048>
- 65 Demongeot, A., Mougner, S., Okada, S., Soulié-Ziakovic, C., & Tournilhac, F. Coordination and catalysis of zn^{2+} in epoxy-based vitrimers. *Polymer Chemistry*, **2016**, 7(27), 4486-4493. <https://doi.org/10.1039/c6py00752j>
- 66 Cifarelli, A., Boggioni, L., Vignali, A., Tritto, I., Bertini, F., & Losio, S. Flexible polyurethane foams from epoxidized vegetable oils and a bio-based diisocyanate. *Polymers*, **2021**, 13(4), 612. <https://doi.org/10.3390/polym13040612>
- 67 Zhang, X., Li, P., Zeng, J., Su, J., Xu, J., Li, J., ... & Chen, K. Dynamically crosslinking cellulose nanofibers and epoxy soybean oil toward tough, recyclable, and degradable bioplastics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2024**, 12(50), 18174-18186. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07183>
- 68 Liu, J. and Bernaerts, K. V. Preparation of lignin-based imine vitrimers and their potential application as repairable, self-cleaning, removable and degradable coatings. *Journal of Materials Chemistry A*, **2024**, 12(5), 2959-2973. <https://doi.org/10.1039/d3ta06338k>
- 69 Kim, J., Choi, W., Park, H. J., Jo, S., Park, K., Cho, H. J., ... & Hong, J. Tunable mechanical properties in biodegradable cellulosic bioplastics achieved via ring-opening polymerization. *ACS Nano*, **2025**, 19(12), 11961-11972. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c16563>
- 70 Ma, Q., Wang, K., Mohawk, D., Chen, Y., Hazra, R. S., & Jiang, L. Strong, ductile, transparent, water-resistant cellulose nanofibril composite films via uv-induced inter-cross-linked networks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2021**, 9(32), 10749-10760. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01222>
- 71 Du, L., Jin, X., Qian, G., Yang, W., Su, L., Ma, Y., ... & Li, S. Lignin-based vitrimer for circulation in plastics, coatings, and adhesives with tough mechanical properties, catalyst-free and good chemical solvent resistance. *Industrial Crops and Products*, **2022**, 187, 115439. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115439>

- 72 Das, D. B., Singh, A., Adari, R., Mudgal, G., & Radha, P. Biocompatible cellulose derivatives: green chemistry and its sustainable applications. *Engineering Materials*, **2025**. 159-190. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76953-5_7
- 73 Yang, Y., Tu, Y., Lou, Z., Gui, X., Kong, J., & Huang, Z. Rapid uv-curable preparation of durable soybean oil-based superhydrophobic anti-icing surfaces with excellent photothermal deicing property. *Applied Surface Science*, **2024**. 653, 159423. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159423>
- 74 Srivastav, R. S. and More, A. P. A comprehensive review of self-healing polymers: mechanisms, types, and industry implications. *Polymers for Advanced Technologies*, **2025**. 36(2). <https://doi.org/10.1002/pat.70092>
- 75 Kamarulzaman, S., Png, Z. M., Lim, E. Q., Lim, I. Z., Li, Z., & Goh, S. S. Covalent adaptable networks from renewable resources: crosslinked polymers for a sustainable future. *Chem*, **2023**. 9(10), 2771-2816. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.04.024>
- 76 Gu, R., Konar, S. K., & Sain, M. Preparation and characterization of sustainable polyurethane foams from soybean oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2012**. 89(11), 2103-2111. <https://doi.org/10.1007/s11746-012-2109-8>
- 77 Liu, H., Ma, Y., Zhou, Y., & Feng, G. A biobased vitrimer: self-healing, shape memory, and recyclability induced by dynamic covalent bond exchange. *ACS Omega*. **2024**. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04264>
- 78 Li, N., Xiang, H., Hu, T., Qiu, W., Hong, Y., Huang, K., ... & Wen, P. Multifunctional electrospun nanofibrous film integrated with cinnamon essential oil emulsion stabilized by dealkali lignin for active packaging material. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2025**. 704, 135467. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135467>
- 79 Ren, Z., Ding, K., Zhou, X., Ji, T., Sun, H., Chi, X., ... & Xu, M. Multiscale interface design for toughened polylactic acid green composites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2024**. 12(34), 12763-12774. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02321>
- 80 Huang, X., Ding, C., Wang, Y., Zhang, S., Duan, X., & Ji, H. Dual dynamic cross-linked epoxy vitrimers used for strong, detachable, and reworkable adhesives. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2024**. 16(29), 38586-38605. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c08123>
- 81 Chong, K. L., Lai, J., Rahman, R. A., Adrus, N., Al-Saffar, Z. H., Hassan, A., ... & Wahit, M. U. A review on recent approaches to sustainable bio-based epoxy vitrimer from epoxidized vegetable oils. *Industrial Crops and Products*, **2022**. 189, 115857. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115857>
- 82 Nair, S. S., Kuo, P., Chen, H., & Yan, N. Investigating the effect of lignin on the mechanical, thermal, and barrier properties of cellulose nanofibril reinforced epoxy composite. *Industrial Crops and Products*, **2017**. 100, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.032>
- 83 Wang, T., Liu, H., Wang, S., & Liao, X. In-situ construct dynamic bonds between lignin and pbat by epoxidized soybean oil to improve interfacial compatibility: processing, characterization, and antibacterial activity for food packaging. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **2025**. 40(2), 445-454. <https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0010>
- 84 Anushikha, & Gaikwad, K. K. Lignin as a UV blocking, antioxidant, and antimicrobial agent for food packaging applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **2024**. 14(15), 16755-16767. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03707-3>
- 85 Gil, M. and Rudy, M. Innovations in the packaging of meat and meat products—a review. *Coatings*, **2023**. 13(2), 333. <https://doi.org/10.3390/coatings13020333>
- 86 Markouti, P., Tzouma, E., Paipetis, A. S., & Barkoula, N. Conventional thermoset composites and their sustainable alternatives with vitrimer matrix—waste management/recycling options with focus on carbon fiber reinforced epoxy resin composites. *Materials*, **2025**. 18(2), 351. <https://doi.org/10.3390/ma18020351>
- 87 Ye, G., Huo, S., Wang, C., Guo, Y., Yang, Q., Song, P., ... & Liu, Z. A transparent epoxy vitrimer with outstanding flame retardancy, toughness, and recyclability enabled by a hyperbranched p/n-derived polyester. *Construction and Building Materials*, **2025**. 470, 140673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140673>
- 88 Xu, B., Xia, Z., Zhan, R., & Yang, K. Fabricating high strength bio-based dynamic networks from epoxidized soybean oil and poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Polymers*, **2024**. 16(16), 2280. <https://doi.org/10.3390/polym16162280>
- 89 Gao, L., Wang, H., Yao, X., Zheng, Z., Wang, L., Wang, Z., ... & Wu, J. High-performance epoxy vitrimer from commercial epoxy-anhydride with reprocessable and chemical degradable properties. *Frontiers in Materials*, **2025**. 12. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1552713>

- 90 Renner, A. C., Thorat, S. S., & Sibi, M. P. Synthesis of biobased polyacetals: a review. *RSC Sustainability*, **2024**. 2(12), 3669-3703. <https://doi.org/10.1039/d4su00488d>
- 91 Shen, S., Thakur, V. K., & Skordos, A. A. Influence of monomer structure and catalyst concentration on topological transition and dynamic properties of dicarboxylic acid-epoxy vitrimers. *Journal of Applied Polymer Science*, **2024**. 141(40). <https://doi.org/10.1002/app.56028>
- 92 Hu, Y., Dai, Y., Zhu, G., Ma, Y., Yuan, L., Tong, S., ... & Zhou, Y. A green and sustainable strategy for recyclable ultraviolet (uv)-curable resin from tartaric acid via three dimensional (3d) printing to reduce plastic pollution. *Journal of Cleaner Production*, **2024**. 436, 140772. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140772>
- 93 Álvarez, M., Reilly, A., Suleyman, O., & Griffin, C. A Systematic Review of Epoxidation Methods and Mechanical Properties of Sustainable Bio-Based Epoxy Resins. *Polymers*, **2025**. 17(14), 1956. <https://doi.org/10.3390/polym17141956>
- 94 Intrawong, J., Nongyai, N., Shin, S., Kim, M., & Kwon, Y. K. Effect of epoxidized soybean oil on biodegradation and mechanical performances of thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Journal of Applied Polymer Science*. **2025**. <https://doi.org/10.1002/app.57401>
- 95 Shao, Y., Zhu, H., Chen, K., Jin, T., Wang, Z., Luo, Z., ... & Gao, Z. Castor oil-based epoxy vitrimer based on dual dynamic network with intrinsic photothermal self-healing capability. *Polymers*, **2025**. 17(7), 897. <https://doi.org/10.3390/polym17070897>
- 96 Qian, Z., Liu, S., Du, G., Wang, S., Shen, Y., Zhou, X., Jiang, S., Niu, H., Duan, Z., & Li, T. Versatile Epoxidized Soybean Oil-Based Resin with Excellent Adhesion and Film-Forming Property. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2023**. 11(13), 5315–5324. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00743>
- 97 Uteulin, K. R., & Zhambakin, K. On the need to develop technologies for producing bioplastics in Kazakhstan. «Доклады НАН РК», **2020**. (5), 42-48. <https://journals.nauka-nanrk.kz/reports-science/article/view/1038/915>
- 98 Iskalieva, A., Orazalin, Z., Yeligbayeva, G., Irmukhametova, G., Taburova, S., & Toktar, T. Synthesis of biodegradable polymer-based on starch for packaging films: a review. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syr= Complex Use of Mineral Resources*, **2024**. 329(2), 110-130. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.22>

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING SODIUM ALUMINOSILICATE FROM RICE HUSK AND INVESTIGATION OF ITS SORPTION PROPERTIES

**M.Tolegenkyzy ¹, R.A.Narmanova ¹, A.Serikkul ², G.S. Dairbekova ², N.A.Akhatayev ¹,
K.Kh. Darmagambet ¹, B.A. Abzhalelov ¹, E.A. Nazarov ¹, N.O.Appazov ^{1*}**

¹Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: nurasar.82@korkyt.kz

Abstract. This study focuses on increasing the value of large-scale agricultural waste – rice husk – considered a silicon-rich renewable resource for the production of functional materials. Special attention is given to the synthesis of sodium aluminosilicate, which serves as an efficient sorbent for the purification of natural and industrial wastewater from heavy metal ions and organic pollutants. The proposed method begins with the preparation of sodium silicate by microwave treatment of a mixture containing 10 g of ground, washed, and air-dried rice husk and 130 mL of 1 M NaOH solution. The obtained sodium silicate solution is then mixed with 50 mL of saturated aluminum sulfate solution under continuous stirring. As a result, sodium aluminosilicate is formed and precipitates out of the solution. Filtration, washing, and thermal treatment of the precipitate at various temperatures yield sorbents with high specific surface area and a well-developed porous structure. This approach not only ensures the efficient utilization of difficult-to-recycle agricultural waste but is also environmentally friendly and resource-efficient. The synthesized aluminosilicates demonstrate excellent sorption capacity, making them promising for use in water treatment systems, industrial emission control, and the development of selective adsorbents.

Keywords: rice husk, sodium silicate, sodium aluminosilicate, adsorption, adsorbent

Tolegenkyzy Meruyert	Master of Technical Sciences; E-mail: meruert.tolegenkyzy22@gmail.com
Narmanova Roza Abdibekovna	Candidate of technical sciences, Associate Professor; E-mail: roza_an@mail.ru
Serikkul Anel	Doctoral student; E-mail: nelliess@mail.ru
Dairbekova Guldana Siyundiykovna	PhD; E-mail: guldina.shudabay@mail.ru
Akhatayev Nurlybek Akarystanuly	Candidate of Chemical Sciences; E-mail: nurlibek.83@mail.ru
Darmagambet Klara Khairullova	Candidate of Chemical Sciences; E-mail: darmklara@mail.ru
Abzhalelov Bakhytbek Baidosovich	Candidate of Biological Sciences; E-mail: bakhytbek@korkyt.kz

Citation: Tolegenkyzy M., Narmanova R.A., Serikkul A., Dairbekova G.S., Akhatayev N.A., Darmagambet K.Kh., Abzhalelov B.A., Nazarov E.A., Appazov N.O. Development of a method for obtaining sodium aluminosilicate from rice husk and investigation of its sorption properties. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 107-116. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.54>

Nazarov Esenzhol Asylbekuly	Candidate of Technical Sciences; E-mail: nazarov_e@korkyt.kz
Appazov Nurbol Orynbasaruly	Candidate of Chemical sciences, professor; E-mail: nurasar.82@korkyt.kz

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ АЛМОСИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ

*М.Толегенкызы*², *Р.А.Нарманова*¹, *А.Сериккул*², *Г.С.Даирбекова*², *Н.А.Ахатаев*¹,
*К.Х.Дармагамбет*¹, *Б.А.Абжалелов*¹, *Е.А.Назаров*¹, *Н.О.Аппазов*^{1*}

¹ НАО «Кызылординский университет имени КORKYT АТА», Кызылорда, Казахстан

² Карагандинский Индустриальный Университет, Темиртау, Казахстан

Резюме. Данное исследование направлено на повышение ценности крупномасштабных сельскохозяйственных отходов – рисовой шелухи, которая рассматривается как богатое кремнием возобновляемое сырьё для получения функциональных материалов. Особое внимание уделено синтезу алюмосиликата натрия, применяемого в качестве эффективного сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод от ионов тяжёлых металлов и органических загрязнителей. Предложенный способ включает получение силиката натрия путём микроволновой обработки смеси, содержащей 10 г измельчённой, промытой и высушенной рисовой шелухи и 130 мл 1 М раствора NaOH. Полученный раствор силиката натрия смешивают с 50 мл насыщенного раствора сульфата алюминия при постоянном перемешивании. В результате протекает реакция образования алюмосиликата натрия с выпадением осадка. Последующая фильтрация, промывка и термообработка осадка при различных температурах позволяют получить сорбенты с высокой удельной поверхностью и развитой пористой структурой. Разработанный метод не только обеспечивает эффективное использование трудноутилизируемых отходов, но и является экологически безопасным и ресурсосберегающим. Полученные алюмосиликаты демонстрируют высокую сорбционную способность, что открывает возможности их применения в системах водоподготовки, очистке промышленных выбросов и создании селективных адсорбентов.

Ключевые слова: рисовая шелуха, силикат натрия, алюмосиликат натрия, адсорбция, адсорбент

Толегенкызы Меруерт	магистр технических наук
Нарманова Роза Абдибековна	кандидат технических наук, доцент
Сериккул Анель	докторант
Даирбекова Гулдана Сиюндыковна	PhD
Ахатаев Нурлыбек Акарыстанулы	кандидат химических наук
Дармагамбет Клара Хайроллакызы	кандидат химических наук
Абжалелов Бакытбек Байдосулы	кандидат биологических наук
Назаров Есенжол Асылбекулы	кандидат технических наук
Аппазов Нурбол Орынбасарулы	кандидат химических наук, профессор

1. Введение

Рис – важнейшая продовольственная культура и основной источник углеводов. При его переработке образуется до 20 % побочного продукта – рисовой шелухи, мировой объём которой достигает 200 млн т в год [1,2]. Благодаря содержанию 20 % SiO₂ и 30–50 % органического углерода [3]

шелуха устойчива к биодegradации и перспективна как сырьё для адсорбентов.

Использование шелухи как топлива ограничено низкой теплотворной способностью и затратами на сбор. В производстве шин и цемента востребован кремнезём, а органическая фракция остаётся неиспользованной. Сжигание шелухи выделяет CO, ЛОС и канцерогенные ПАУ, нанося вред экологии и здоровью [4,5]. Эффективная утилизация этой биомассы – актуальная задача стран-производителей риса.

Разрабатываются «зелёные» методы переработки шелухи для получения ценных продуктов: кремнезёма, активированного угля, биочара, целлюлозы [6–9]. Особый интерес представляют алюмосиликаты – пористые соединения алюминатов и силикатов, применяемые в адсорбции, катализе, пиролизе. Их свойства зависят от метода синтеза [10], а синтетические образцы стабильнее и чище природных аналогов [12,13].

Сельхозотходы кремнийнакапливающих культур, включая рис, рассматриваются как сырьё для синтеза алюмосиликатов. Основной способ утилизации отходов – сжигание, при котором образуется зола, богатая SiO₂ [19,20]. Получение алюмосиликатов из растительного сырья пока малоизучено, хотя они могут служить селективными сорбентами [12,15].

Алюмосиликаты используются как сорбенты, носители катализаторов, ионообменники, применяются при разделении газов и детоксикации кормов [10,16–18]. Композиты на их основе служат сенсорами CO₂ [10]. Их кислотно-основные свойства определяют реакционную способность и сорбционную ёмкость по отношению к тяжёлым металлам и красителям [12].

Показано, что наноструктурированный аморфный алюмосиликат натрия с удельной поверхностью 364 м²/г можно получить щелочным гидролизом рисовой соломы [2]. Описан синтез алюмосиликатов с Si/Al = 1–5 в многокомпонентной системе и их высокая сорбция Cs⁺ [24].

2. Экспериментальная часть

Целью данного исследования являлась разработка способа получения адсорбента на основе алюмосиликата натрия для очистки природных и сточных вод. Метод заключался в смешивании 50 мл насыщенного раствора сульфата алюминия с раствором силиката натрия, полученным микроволновой обработкой смеси 130 мл 1 М NaOH и 10 г измельчённой, промытой и высушенной рисовой шелухи. В результате образовывался осадок, который после термической обработки при различных температурах превращался в сорбент с разными адсорбционными характеристиками.

Рисовую шелуху промывали дистиллированной водой, сушили при 105 °С 2 ч и измельчали в порошок. Навеску 10 г смешивали со 130 мл 1 М NaOH и обрабатывали в микроволновке при 900 Вт 10 мин с перемешиванием. После охлаждения смесь фильтровали под вакуумом,

фильтрат с силикатом натрия обрабатывали 50 мл раствора сульфата алюминия, образуя светло-коричневый осадок.

Осадок фильтровали, промывали до нейтральной реакции и сушили. Для подбора оптимальных условий проводили прокалку при 150–800 °С в течение 1 ч (скорость нагрева 10 °С/мин) в муфельной печи. Полученные образцы отличались цветом и сорбционными свойствами (рисунок 1).



Рисунок 1 – Образцы сорбентов алюмосиликата натрия, полученных из рисовой шелухи

Адсорбционную активность полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи оценивали по ёмкости адсорбции йода. Адсорбционную активность образцов сорбентов по йоду определяли в соответствии с ГОСТ 6217-74.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных сорбентов проводили на дифрактометре Rigaku SmartLab SE с Cu K α -излучением ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) при напряжении 40 кВ и силе тока 50 мА. Дифрактограммы регистрировали в диапазоне углов 2θ от 5° до 80° с шагом сканирования 0,001° и скоростью сканирования 2°/мин.

Элементный анализ проводили на рентгенофлуоресцентном спектрометре Rigaku NEX GG (Япония). Данный метод позволяет точно определить содержание различных элементов в адсорбенте, что необходимо для оценки его структуры и свойств.

ИК-спектры с преобразованием Фурье (Фурье) регистрировали на спектрометре Shimadzu IR-Prestige 21 (Япония) в диапазоне длин волн 400–4000 см⁻¹ без специальной подготовки образцов с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Smiths DuraSamplIR II с призмой однократного отражения из алмаза/ZnSe (США).

Морфологию поверхности сорбента исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа JEOL JSM-6390LV.

3. Результаты и обсуждение.

Исследование показало, что натрийалюмосиликатный адсорбент из рисовой шелухи эффективно поглощает йод из растворов. При 150–700 °С адсорбционная активность достигает 81,2%, но при 750–800 °С снижается. Эти результаты подтверждают его перспективность для очистки природных и сточных вод от загрязнителей. Данные по адсорбции йода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Адсорбционная активность полученных образцов сорбента по йоду

Температура, °С	Адсорбционная активность, %
150	20.0
200	22.7
250	18.0
300	18.2
350	21.0
400	22.6
450	23.0
500	25.7
550	30.0
600	41.1
650	66.3
700	81.2
750	56.7
800	32.0

Для изучения кристаллической структуры сорбентов использовали рентгеновскую дифракцию (Rigaku SmartLab SE, Cu K α). Установлено, что при разных температурах формируются различные фазы силиката алюминия (рисунок 2).

Силикат алюминия: 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C и 700°C (12 образцов). Рентгеновские дифрактограммы показали наличие кальцита (CaCO₃) только при температуре образца 150 °С. Для всех остальных образцов на рентгенограммах преобладают аморфные пики (при 2 θ около 20-30 °С при низких температурах) и слабые кристаллические пики (при высоких температурах), соответствующие аморфному и слабокристаллическому алюмосиликатному гелю. В аморфных фазах отсутствуют четко выраженные кристаллографические плоскости (т.е. отсутствует дальняя периодичность, только ближний порядок), удовлетворяющие закону Брэгга, поэтому острые дифракционные пики отсутствуют. Однако из-за ближнего порядка сохраняются предпочтительные межатомные расстояния. Они приводят к появлению широких диффузных максимумов рассеяния на рентгенограммах, часто называемых аморфными пиками или гало.

Остальные пики на рентгенограммах соответствуют слабокристаллическим цеолитовым фазам: анальциму, цеолиту X (каркас типа FAU) и цеолиту A (каркас типа LTA), соответствующим номерам карт ICDD: 00-041-1478, 00-038-0237 и 00-043-0142 соответственно, которые образуются в процессе осаждения. Интенсивность этих фаз неравномерна с повышением температуры, что обусловлено их термической нестабильностью. Также наблюдались следы кварца (SiO_2) и альбита ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

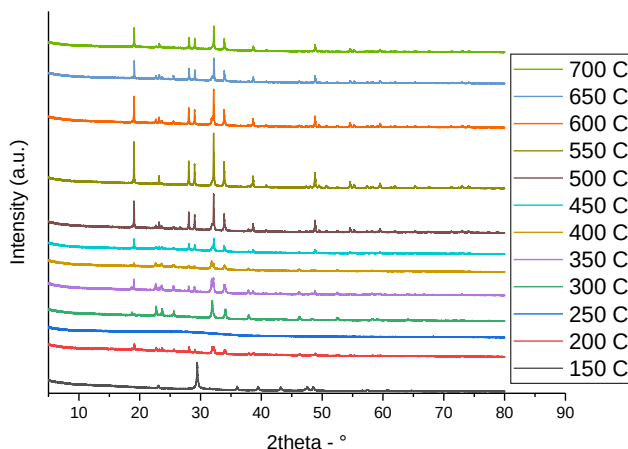


Рисунок 2 – Фазовый анализ образцов, проведённый методом рентгеновской дифракции с использованием установки Rigaku SmartLab SE

Таблица 2 – Элементный анализ полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия

Температура, °C	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	Fe_2O_3
150	56.80	10.60	1.45	0.255	0.154	0.022
200	57.20	10.90	1.38	0.284	0.157	0.027
250	59.40	11.50	4.63	0.918	0.363	0.069
300	56.00	9.75	8.40	0.166	0.125	0.014
350	57.20	15.00	1.01	0.235	0.184	0.033
400	57.30	8.82	2.38	0.449	0.249	0.013
450	55.70	9.60	7.17	0.471	0.201	0.035
500	56.20	11.60	6.76	0.133	0.051	0.022
550	55.90	12.30	4.15	0.268	0.029	0.047
600	56.10	14.80	2.92	0.287	0.223	0.054
650	56.10	19.60	2.19	0.218	0.188	0.063
700	58.20	18.90	2.14	0.219	0.198	0.062
750	56.20	17.50	2.17	0.213	0.189	0.056
800	55.40	9.50	7.15	0.456	0.201	0.035

Элементный состав адсорбентов на основе алюмосиликата натрия, полученных при разных температурах, определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре NEX GG (Rigaku, Япония). Метод позволил точно установить содержание элементов, необходимое для оценки структуры и свойств материалов. Результаты приведены в таблице 2.

Температурные изменения состава неравномерны:

- до 300 °С происходит выгорание органики и рост Na_2O ;
- при 350–650 °С активизируются переходы алюмосиликатов, повышается Al_2O_3 ;
- выше 650 °С стабилизируются SiO_2 и Al_2O_3 , формируются устойчивые фазы.

Оптимальный диапазон стабилизации структуры зола – 600–700 °С, где содержание SiO_2 достигает 56–58 %, а Al_2O_3 – 15–19 %, что обеспечивает более упорядоченную алюмосиликатную матрицу.

В ИК-спектрах полученных алюмосиликатных сорбентов наблюдаются полосы поглощения деформационных колебаний Si-O-Si в области 432 см^{-1} , валентное симметричное колебание иона SiO_4 в области 578 см^{-1} , колебания связи Al-O-Si в области 694 см^{-1} и валентные колебания Si-O в связях Si-O-Al при 968 см^{-1} (во всех продуктах ИК-спектры идентичны). ИК-спектр адсорбента, полученного при температуре 700°С является оптимальным и приведен на рисунке 3.

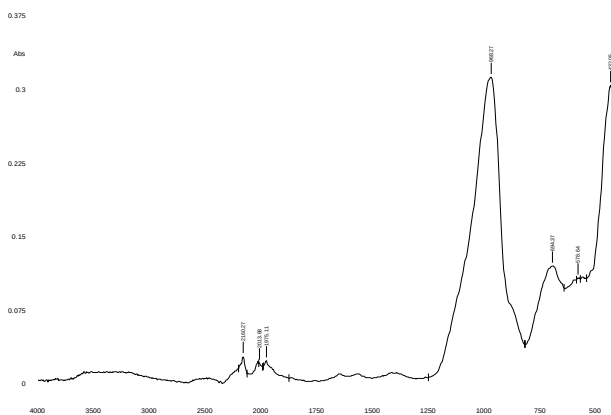


Рисунок 3 – ИК-Фурье спектр алюмосиликата натрия, полученного в оптимальных условиях

Микрофотография, полученная методом SEM на микроскопе JSM-6510 (JEOL, Япония), использовалась для анализа морфологии и состава адсорбента. Установлено, что алюмосиликатный адсорбент из рисовой шелухи имеет поры диаметром 0,1–1 мкм (Рисунок 4).

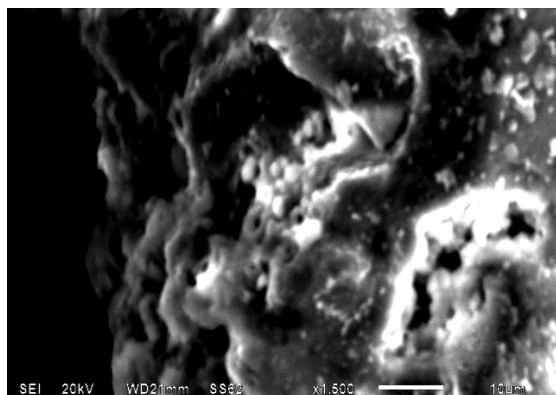


Рисунок 4 – Микрофотография измельченного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи x1500 кратное увеличение, полученное при 700°C

4. Заключение.

Предложенный нами метод получения алюмосиликата натрия из рисовой шелухи является эффективным и экологически устойчивым. Он позволяет утилизировать отходы сельского хозяйства и получать ценные адсорбенты с высокими характеристиками. Метод прост в реализации и может быть оптимизирован для получения продукта с заданными свойствами. Исследование адсорбционной активности по йоду полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи показало, что материал обладает значительной способностью поглощать йод из растворов. При 700°C адсорбционной активности по йоду увеличивается до 81,2%, это свойство делает его потенциально эффективным для очистки природных и сточных вод и других жидких сред от йодсодержащих загрязнений.

Благодарность. Авторы благодарят Лабораторию инженерного профиля НАО «Кызылординский университет им. Коркыт Ата» за техническую поддержку проведенных исследований.

Финансирование. Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ No. BR21882415).

Конфликт интересов: Конфликт интересов между авторами отсутствует.

ҚҰРШ ҚАЗЫБЫНАН НАТРИЙ АЛЮМОСИЛИКАТЫН АЛУ ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

*М. Төлегенқызы*², *Р.А.Нарманова*¹, *А. Серікқұл*², *Г.С.Даирбекова*², *Н.А.Ахатаев*¹,
*К.Х.Дармагамбет*¹, *Б.А.Абжасалов*¹, *Е.А.Назаров*¹, *Н.О.Аппазов*^{1*}

¹"Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті" КеАҚ, Қызылорда, Қазақстан

²Қарағанды Индустриялық Университеті, Теміртау, Қазақстан

Түйіндеме. Бұл зерттеу көлемді ауыл шаруашылығы қалдығы – күріш қауызының құндылығын арттыруға бағытталған. Күріш қауызы кремнийге бай жаңартылатын шикізат ретінде қарастырылып, функционалды материалдар алуға қолданылады. Ерекше назар натрий алюмосиликатын синтездеуге аударылды, ол табиғи және өнеркәсіптік ағын суларды ауыр металл иондарынан және органикалық ластағыштардан тазартуға арналған тиімді сорбент ретінде пайдаланылады. Ұсынылған әдіс натрий силикатын алудан басталады: ол 10 г ұнтақталған, сумен жуылған және кептірілген күріш қауызы мен 130 мл 1 М NaOH ерітіндісінің қоспасын микротолқынды сәулемен өңдеу арқылы алынады. Алынған натрий силикат ерітіндісін 50 мл қаныққан алюминий сульфаты ерітіндісімен араластырады. Нәтижесінде натрий алюмосиликаты түзіледі, ол тұнба түрінде бөлінеді. Тұнбаны сүзу, жуу және әртүрлі температурада термиялық өңдеу арқылы жоғары меншікті беті мен дамыған кеуекті құрылымы бар сорбенттер алынады. Бұл әдіс қайта өңдеуге қиын қалдықтарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етіп қана қоймай, экологиялық қауіпсіз әрі ресурсты үнемдеуші болып табылады. Алынған алюмосиликаттар жоғары сорбциялық қабілет көрсетіп, оларды су тазарту жүйелерінде, өнеркәсіптік шығарындыларды залалсыздандыруда және селективті адсорбенттер жасауда қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: күріш қауызы, натрий силикаты, натрий алюмосиликаты, адсорбция, адсорбент

Төлегенқызы Меруерт	<i>Техника ғылымдарының магистрі</i>
Нарманова Роза Абдибековна	<i>Техника ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
Серікқұл Анель	<i>Докторант</i>
Даирбекова Гулдана Сиюндыковна	<i>PhD</i>
Ахатаев Нурлыбек Ақарыстанұлы	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
Дармагамбет Клара Хайроллаевна	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
Абжалелов Бакытбек Байдосұлы	<i>Биология ғылымдарының кандидаты</i>
Назаров Есенжол Асылбекұлы	<i>Техника ғылымдарының кандидаты</i>
Аппазов Нурбол Орынбасарұлы	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>

References

1. Rice Market Monitor. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017, 20(2), 36. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24108.95368>
2. P.N. Babaso, H. Sharanagouda, Rice husk and its applications: Review, *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, **2017**, 6(10), 1144–1156. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138>
3. S.S. Shukla, R. Chava, S. Appari, A. B., B.V.R. Kuncharam, Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2022**, 10(1), 106899. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899>
4. V.I. Kuprianov, R. Kaewklum, K. Sirisomboon, P. Arromdee, S. Chakrithakul, Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. *Appl. Energy*, **2010**, 87, 2899–2906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.009>
5. M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Luo, K. Cen, Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel Process. Technol.*, **2004**, 85, 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.002>
6. S. Ijaz, A. Kausar, M. Iqbal, N. el Messaoudi, Y. Miyah, S. Knani, B. Graba, Advances in extraction of silica from rice husk and its modification for friendly environmental wastewater treatment via adsorption technology, *J. Water Process Eng.*, **2025**, 71, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107187>
7. M.A. Taiye, W. Hafida, F. Kong, C. Zhou, A review of the use of rice husk silica as a sustainable alternative to traditional silica sources in various applications. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **2024**, 43(6), 14451. <https://doi.org/10.1002/ep.14451>

8. Jandosov J, Alavijeh M, Sultakhan S, Baimenov A, Bernardo M, Sakipova Z, Azat S, Lyubchik S, Zhylybayeva N, Naurzbayeva G, et al. Activated Carbon/Pectin Composite Enterosorbent for Human Protection from Intoxication with Xenobiotics Pb(II) and Sodium Diclofenac. *Molecules*, **2022**, 27(7), 2296. <https://doi.org/10.3390/molecules27072296>
9. S.B. Lyubchik, A.I. Lyubchik, E.S. Lygina, S.I. Lyubchik, T.L. Makarova, J. Vital, A.M.B.d. Rego, I.M. Fonseca, Simultaneous removal of 3d transition metals from multi-component solutions by activated carbons from co-mingled wastes. *Sep. Purif. Technol.*, **2008**, 60(3), 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.08.020>
10. Sibani M., Jyostnarani S., Barsha D. Synthesis and characterizations of different aluminosilicate nano matrices. *Materials Today: Proceedings*, **2021**, 35(2), 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.224>
11. Panasenko A.E., Borisova P.D., Arefyeva O.D., Zemnukhova L.A. Aluminosilicates from rice straw: synthesis and sorption properties. *Chemistry of Plant Raw Material*, **2019**, 3, 291-298. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034278>
12. Hussin F. N. N. M., Wahab R. A., Attan N. Nanocellulose and nanoclay as reinforcement materials in polymer composites: A review. *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, **2020**, 16(2), 145-153. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v16n2.1430>
13. Satlewal A., Agrawal R., Bhagia S., Das P., Ragauskas A.J. Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties. *Boifuels, Bioproducts and Biorefining*, **2017**, 12(9), 83-107. <https://doi.org/10.1002/bbb.1818>
14. Borai E., Harjula R., Malinen L., Paajanen A. Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 172(1), 416-422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>
15. N. E. Gordina, R. N. Rumyantsev, T. N. Borisova, A. E. Kolobkova, E. V. Tsvetova, E. E. Afanas'eva, E. S. Severgina, V. Yu. Prokof. Use of Combinations of Ultrasonic Processing and Microwave Crystallization to Intensify the Synthesis of LTA Zeolite Membranes. *Petroleum Chemistry*, **2020**, 60(4), 550-556. <https://doi.org/10.1134/S0965544120040155>
16. Abha D., Deepti G., Anuradha M. Zeolites in Wastewater Treatment. eBook: *RSC Green Chemistry*, **2013**, 82-104. <https://doi.org/10.1039/9781849735001-00082>
17. A.J. Ramos, E. Hernández Prevention of aflatoxicosis in farm animals by Means of hydrated sodium calcium aluminosilicate addition to feedstuffs: A review. *Animal Feed Science and Technology*, **1997**, 65(1-4), 197-206. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01084-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01084-X)
18. S. Nakayama and Y. Sadaoka, J. Preparation of Na₃Zr₂Si₂PO₁₂-sodium aluminosilicate composite and its application as a solid-state electrochemical CO₂ gas sensor. *Mater. Chem.*, **1994**, 4(5), 663-668. <https://doi.org/10.1039/JM9940400663>
19. Yarusova, S.B., Panasenko, A.E., Gordienko, P.S. et al. Synthesis of Nanostructured Sodium Aluminosilicate from Rice Straw and Its Sorption Properties. *Inorg. Mater*, **2019**, 55, 308-314. <https://doi.org/10.1134/S0020168519030166>
20. Azat S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, **2019**, 217, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
21. Azat S., Sartova Zh., Bekseitova K., Askaruly K. Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment. *Turkish Journal of Chemistry*, **2019**, 43(5), 1258-1269. <https://doi.org/10.3906/kim-1903-53>
22. Kydyr A., Mukhtar Y., Azamat T., Bibigul S., Aidos T., Nurzhamal Zh., Seitkhan A., Alisher A.r, Chingis D., A facile synthesis of graphite-coated amorphous SiO₂ from biosources as anode material for libs. *Materials Today Communications*, **2023**, 34, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105136>
23. Yergaziyeva, G., Mambetova, M., Makayeva, N., Diyarova, B., Appazov, N., Lithium-containing sorbents based on rice waste for high-temperature carbon dioxide capture. *Journal of Composites Science*, **2024**, 8(9), 376. <https://doi.org/10.3390/jcs8090376>
24. Nekhludova, E.A., Ivanov, N.P., Yarusova, S.B. et al. Synthesis and Sorption Properties of Nanostructured Sodium Aluminosilicates Differing in Si/Al Ratio. *Inorg Mater*, **2023**, 59, 1303-1312. <https://doi.org/10.1134/S0020168523120075>

STABILIZATION OF ASPHALTENE DEPOSITION USING NEW DEEP EUTECTIC SOLVENTS

K.A. Sadykov¹, S.B. Ryspaeva^{*2}, A.Zh. Kerimkulova², Sh.S. Islam², K. Maratkyzy², E. Aryslan²

¹JSC Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan

²NJSC Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: rysapaeva95@inbox.ru

Abstract: *Introduction.* One of the major challenges in oil production and transportation is the aggregation and precipitation of asphaltenes, which leads to the formation of deposits in pipelines and equipment, thereby reducing operational efficiency. Preventing asphaltene precipitation is essential for improving the stability and environmental safety of petroleum systems. *The purpose of the work:* To investigate the efficiency of betaine-based deep eutectic solvents (DESS) as inhibitors of asphaltene aggregation and precipitation. *Results and discussions:* The synthesized DES was tested on a model oil system prepared from toluene and asphaltenes extracted from Karazhanbas crude oil. UV-visible spectrophotometry showed that the addition of DES reduced the absorption intensity by 40–45% and shifted the precipitation onset point from an n-heptane/toluene ratio of 1.0 to 1.2. Rheological measurements revealed a decrease in viscosity from 78.2 to 45.6 mPa·s, indicating reduced asphaltene aggregation and improved colloidal stability. *Conclusion:* The betaine-based DES demonstrated high efficiency as a “green” asphaltene inhibitor. The obtained results confirm the potential of such compounds for improving oil production stability, extending equipment lifetime, and reducing environmental risks.

Keywords: asphaltene, deep eutectic solvent, inhibitor, oil, propylene glycol, betaine, UV spectrophotometer.

Kanat Amirkulovich Sadykov	Master of Chemistry; E-mail: kanat.sadykov.80@bk.ru
Salimat Bukenkyzy Ryspaeva	Master of Natural Sciences; E-mail: rysapaeva95@inbox.ru
Kerimkulova Aigul Zhadraevna	Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor; E-mail: kerimkulova07@mail.ru
Islam Sholpan Saparbayeva	PhD; E-mail: sholpan_islamova@mail.ru
Kamila Maratkyzy	Master's student
Yerulan Aryslan	Master's student

Citation: Sadykov K.A., Ryspaeva S.B., Kerimkulova A.Zh., Islam Sh., Maratkyzy K., Aryslan E. Stabilization of asphaltene deposition using new deep eutectic solvents. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 117-127. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.55>

СТАБИЛИЗИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АСФАЛЬТЕНОВ С ПОМОЩЬЮ НОВЫХ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

К.А. Садыков¹, *С.Б. Рыспаева², А.Ж. Керимкулова²,
Ш.С. Ислам², К. Маратқызы², Е. Арыслан²

¹АО «Институт химических наук имени А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан

²Satbayev University, НАО, Алматы, Казахстан

Резюме. *Введение.* Одной из наиболее серьёзных проблем при добыче и транспортировке нефти остаётся агрегация и выпадение асфальтенов, вызывающие образование отложений в трубопроводах и оборудовании. Предотвращение осаждения асфальтенов является важной задачей для повышения стабильности и экологической безопасности нефтяных систем. *Цель работы:* Исследовать эффективность глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) на основе бетаина в качестве ингибиторов агломерации и осаждения асфальтенов. *Результаты и обсуждения:* Синтезированный ГЭР был протестирован на модельной нефти, приготовленной на основе толуола и асфальтенов, выделенных из нефти Каражанбасского месторождения. Методом УФ-спектроскопии установлено, что при добавлении ГЭР интенсивность поглощения снижается на 40–45 %, а точка начала осаждения смещается с соотношения н-гептан/толуол 1,0 до 1.2. Реологические исследования показали уменьшение вязкости с 78.2 до 45.6 мПа·с, что свидетельствует о снижении степени агломерации асфальтенов и стабилизации коллоидной системы. *Вывод:* Глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина проявил высокую эффективность в качестве «зелёного» ингибитора асфальтенов. Полученные данные подтверждают перспективность применения таких соединений для повышения надёжности нефтепромысловых процессов, продления срока службы оборудования и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: асфальтен, глубокий эвтектический растворитель, ингибитор, нефть, пропиленгликоль, бетаин, УФ-спектрофотометр.

<i>Садыков Канат Амиркулович</i>	<i>магистр химических наук</i>
<i>Рыспаева Салимат Букенқызы</i>	<i>магистр естественных наук</i>
<i>Керимкулова Айгуль Жадраевна</i>	<i>кандидат химических наук, ассоциированный профессор</i>
<i>Ислам Шолпан Сапарбайқызы</i>	<i>PhD</i>
<i>Маратқызы Камила</i>	<i>магистрант</i>
<i>Арыслан Ерулан</i>	<i>магистрант</i>

1. Введение

Нефть является основой производства горюче-смазочных материалов в нашей стране. Производство и транспортировка нефтепродуктов осуществляется по трубопроводам. Поскольку состав нефти включает тяжелые смолисто-асфальтеновые соединения, они быстро оседают на стенках труб. Одним из таких смолистых соединений является асфальтен. Асфальтены оседают на стенках труб и оборудования в процессе переработки нефти, создавая препятствия. Чтобы избежать этого недостатка, необходимо использовать в составе нефти ингибитор асфальтенов — глубокий эвтектический растворитель [1,2].

Основной целью исследования было синтезировать «зелёный» ингибитор, замедляющий процесс осаждения асфальтенов, обладающий низким вредным воздействием на окружающую среду и относительно

невысокой стоимостью. Поскольку ингибитор замедляет протекание определённого процесса, перед нами стояла задача синтезировать соединение, способное замедлить осаждение асфальтенов. На основе анализа литературы и предыдущих исследований были выбраны основные сырьевые компоненты, методика и технология проведения исследования. В литературе указано, что глубокие эвтектические растворители были синтезированы и использованы для различных целей. Проведен обзор исследований и публикаций, связанных с нефтепродуктами, и выбраны наиболее оптимальные и доступные по стоимости соединения.

В ходе исследования были изучены образцы нефти, полученные с двух месторождений. Сравнив с предыдущими исследованиями, был выбран подходящий глубокий эвтектический растворитель. Взаимодействие с асфальтенами, содержащимися в нефти, исследовалось с помощью прибора, работающего в ультрафиолетовом диапазоне. На основе полученных результатов были сделаны соответствующие выводы [3,4].

Глубокий эвтектический растворитель (ГЭР) не является строго определённым химическим соединением, однако в большинстве случаев представляет собой двухкомпонентную смесь, содержащую в молярном соотношении соответствующие компоненты – донор и акцептор водородной связи (ДВС и АВС) [5]. Компоненты ГЭР полностью смешиваются между собой, и это смешивание, как правило, происходит благодаря образованию водородных связей, поэтому они проявляют неидеальное поведение в жидкой фазе. В отличие от ионных жидкостей, ГЭР можно получить из биоразлагаемых компонентов с использованием простых методов. Обычно они менее токсичны и дешевле в синтезе.

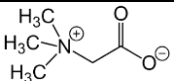
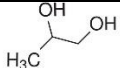
Для применения ГЭР в ингибировании асфальтенов важны следующие свойства: высокая способность растворять различные вещества, химическая и термическая стабильность, низкое давление пара и негорючесть. Также доказана возможность их регенерации [6]. ГЭР взаимодействует с различными компонентами посредством водородных связей и Ван-Дер-Ваальсовых сил, а также за счёт электростатического взаимодействия, что обеспечивает отличную совместимость с полярными веществами. Свойства DES можно изменять путём замены донора или акцептора водородной связи на другой химический компонент либо путём изменения их молярного соотношения. Это расширяет потенциал применения DES в различных областях [7].

Наиболее часто применяемый способ получения всех видов ГЭР заключается в смешивании компонентов в заданном молярном соотношении и нагревании смеси до средней высокой температуры (обычно 60–100°C) в течение нескольких часов до образования однородной прозрачной жидкости [8].

2. Экспериментальная часть

Для приготовления глубоких эвтектических растворителей в качестве акцептора водородной связи (АВС) был использован бетаин благодаря низкой стоимости, биоразлагаемости и низкой токсичности, а в качестве донора водородной связи (ДВС) был использован пропиленгликоль (1,2-пропандиол). В таблице 1 приведена информация о компонентах.

Таблица 1 – Компоненты для приготовления ГЭР

№	АВС	Структурная формула	ДВС	Структурная формула	Мольное соотношение
1	Бетаин		Пропиленгликоль		1:4

Эвтектические смеси были получены путём смешивания двух компонентов в соответствующем молярном соотношении (таблица 1) при температуре 80 °С и нормальном давлении до образования однородной бесцветной жидкости.



Рисунок 1 – ГЭР полученный на основе бетаина и пропиленгликоля.

Соотношение 1:4 обеспечивает оптимальное образование водородных связей, что улучшает растворяющую способность ГЭР. Кроме того, такая пропорция позволяет достичь стабильной и однородной жидкой фазы при умеренном нагреве.

Асфальтены экстрагировали из нефти месторождения Каражанбас (Казахстан) по методу IP143. Для получения асфальтенов из сырой нефти, к заранее отмеренному количеству нефти (по 5 мл) добавляют н-гептан и оставляют на сутки в защищённом от солнечного света месте. В течение 24 часов нефть и н-гептан взаимодействуют, в результате чего на дне раствора образуется осадок асфальтенов. Верхний слой нефти аккуратно отделяют, не перемешивая, с помощью фильтрации. Для этого готовят фильтровальную систему с фильтровальной бумагой. Бумагу размещают так, чтобы она удобно входила в колбу, затем раствор аккуратно выливают на фильтр (рисунок 2,3). Жидкая часть нефти с низким содержанием

асфальтенов проходит через фильтр и собирается на дне колбы. Этот процесс занимает много времени, так как на пористой поверхности фильтровальной бумаги оседают смолистые асфальтеновые соединения, уменьшая скорость прохождения жидкости.



Рисунок 1 – Осаждение асфальтенов в нефти Каражанбас с помощью н-гептана.



Рисунок 2 – Осажденные асфальтены в фильтровальной бумаге.

Далее с помощью экстрактора Сокслета экстрагируем асфальтены с помощью толуола при 120°C в течении 40 минут.

Полученные асфальтены подвергаются сушке в сушильном шкафу при температуре 100°C в течение 24 часов для удаления излишней влаги. В результате получается полностью высушенный асфальтен, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Высушенный асфальтен.

Для дальнейшего изучения влияния зелёного ингибитора на асфальтены готовится модельное масло на основе асфальтенов. Было приготовлено 150 мл раствора асфальтенов, синтезированных из нефти Жанаозен, в толуоле. Асфальтены, полученные из нефти Каражанбас, смешали со 100 мл толуола. Растворы заливаются в магнитную мешалку и перемешиваются при температуре 80 °С и частоте 200 об/мин в течение 1 часа.

Изменение вязкости и реологических свойств раствора при добавлении глубокого эвтектического растворителя

Методика исследования:

Для оценки влияния глубокого эвтектического растворителя (ГЭР) на структурно-реологические свойства нефтяных систем проводилось измерение динамической вязкости модельных образцов нефти до и после добавления ГЭР в различных объемах (0 мл, 0.2 мл, 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл). Измерения выполнялись с помощью ротационного вискозиметра при температуре 25 °С. Для обеспечения точности каждый эксперимент проводился трижды, после чего вычислялось среднее значение вязкости.

3. Результаты и их обсуждение

Исследование влияния глубокого эвтектического растворителя на процессы агломерации асфальтенов в нефтях Каражанбас и Жанаозен методом ультрафиолетовой спектроскопии

Для оценки эффективности ингибирования осаждения асфальтенов глубокими эвтектическими растворителями использовался метод УФ-спектроскопии. Каждый эксперимент проводился в трёх повторностях для обеспечения воспроизводимости результатов. Интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения измерялась для каждого образца, после чего рассчитывались средние значения и стандартное отклонение. Погрешность измерений не превышала 2–3 %, что соответствует характеристикам используемого спектрофотометра. Для анализа данных использовалась стандартная статистическая обработка — вычисление средних значений, стандартных отклонений и построение графиков зависимости оптической плотности от объёма добавленного н-гептана.

Суть заключается в добавлении глубокого эвтектического растворителя к приготовленному модельному маслу с последующим титрованием нормальным гептаном. Модельное масло и глубокий эвтектический растворитель смешивали в соотношении 1:1, после чего в эту смесь титровывая добавляли 0.1 мл, 0.2 мл, 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл н-гептана. Каждый титрованный образец подвергался анализу с использованием ультрафиолетового спектрофотометра. На диаграмме (рисунок 4) ниже показана интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения.

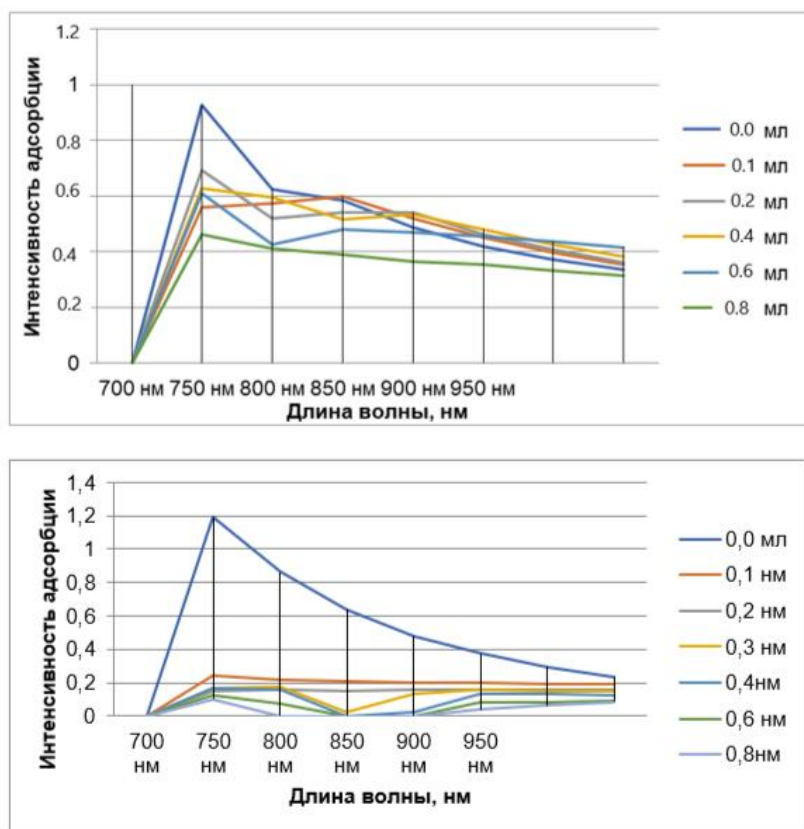


Рисунок 4 – Интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения частиц асфальтена.

Образец, в который не был добавлен глубокий эвтектический растворитель (обозначен как 0 мл), демонстрирует наивысшую степень поглощения ультрафиолетового излучения. При осаждении асфальтенов их молекулы стремятся к агрегации. Чем больше агрегатов образуется в растворе, тем меньше способность излучения проходить через него, и тем выше степень поглощения — адсорбции. В образце, в который добавлен ингибитор — глубокий эвтектический растворитель, степень агрегации снижается, так как ингибитор замедляет этот процесс. Соответственно, и степень адсорбции излучения также снижается. В частности, в образце нефти Каражанбас при добавлении 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл н-гептана уровень излучения на графике оказался равным нулю. Это свидетельствует об отсутствии агрегации, препятствующей прохождению излучения.

Результаты испытания определения точки начала осаждения асфальтенов методом УФ-спектрометрии.

Поведение агрегации асфальтенов и точка начала их осаждения были исследованы методом УФ-видимой спектрофотометрии. При титровании

модельных образцов н-гептаном наблюдалось постепенное снижение интенсивности поглощения вследствие разбавления раствора. Точка начала осаждения определялась в момент, когда эффект агрегирования частиц асфальтенов начинал преобладать над эффектом разбавления, что проявлялось изменением характера кривой поглощения. В исходных образцах интенсивность поглощения составляла около 0.45, после добавления н-гептана она снижалась до 0.25–0.26 в зависимости от присутствия ингибитора (рисунок 5).

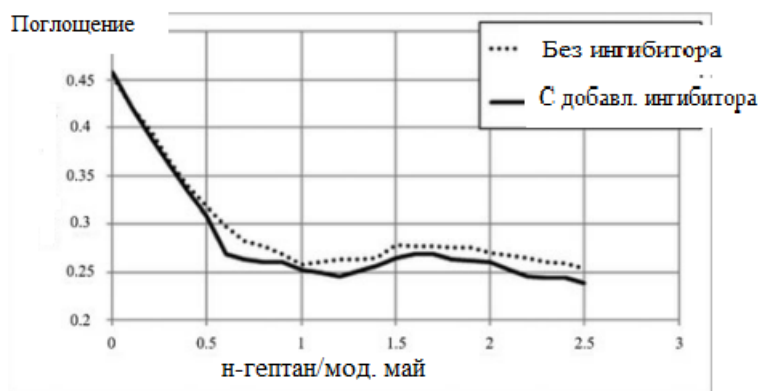


Рисунок 5 - Кривая интенсивности поглощения, полученная при изменении соотношения н-гептана и толуола для определения точки начала осаждения.

Для образцов, содержащих глубокий эвтектический растворитель (ГЭР), точка начала осаждения наступала при соотношении н-гептан/толуол = 1,2, тогда как для образцов без ингибитора — при соотношении 1.0. Это свидетельствует о том, что добавление ГЭР смещает момент начала агломерации, повышая устойчивость коллоидной системы и уменьшая склонность асфальтенов к осаждению. Более высокое значение соотношения н-гептан/толуол указывает на необходимость большего количества осаждающего агента для нейтрализации ингибирующего эффекта растворителя, что подтверждает эффективность ГЭР в качестве ингибитора асфальтеновой агломерации.

Изменение вязкости и реологических свойств раствора при добавлении глубокого эвтектического растворителя

В исходных образцах (0 мл ГЭР) наблюдалась повышенная вязкость, что связано с активным процессом агломерации асфальтенов и формированием устойчивой пространственной структуры, препятствующей течению. После введения глубокого эвтектического растворителя вязкость раствора заметно снижалась. Это объясняется тем, что ГЭР разрушает межмолекулярные связи между частицами асфальтенов, препятствуя их агрегации и осаждению. При концентрациях 0.4–0.8 мл система приобретала квазиньютоновский характер течения — вязкость становилась стабильной и

мало зависела от скорости сдвига, что указывает на формирование равномерной, устойчивой коллоидной системы. Таким образом, анализ реологических характеристик подтвердил эффективность ГЭР как ингибитора агломерации асфальтенов и стабилизатора нефтяной среды.

Таблица 2 – Изменение вязкости и оптической плотности при добавлении ГЭР

Образец	Объём ГЭР, мл	Вязкость, мПа·с	SD	Оптическая плотность ($\lambda=400$ нм)	SD
1	0.0	78.2	2.3	1.45	0.05
2	0.1	69.4	1.9	1.12	0.03
3	0.4	53.6	2.1	0.58	0.02
4	0.8	45.6	1.8	0.00	0.00

По результатам исследований были найдены усреднённые значения вязкости и оптической плотности модельного масла в зависимости от объёма добавленного глубокого эвтектического растворителя (ГЭР). Каждое измерение выполнялось в трёх повторностях; указаны средние значения и стандартное отклонение (SD).

Расширенное обсуждение механизма взаимодействия ГЭР с асфальтенами

Полученные результаты позволяют предложить вероятный механизм ингибирования агломерации асфальтенов глубоким эвтектическим растворителем (ГЭР) на основе бетаина. Установлено, что введение ГЭР приводит к смещению точки начала осаждения асфальтенов в область более высоких значений соотношения *n*-гептан/толуол и к снижению интенсивности УФ-поглощения, что указывает на уменьшение степени агрегации. Это свидетельствует о том, что ГЭР вмешивается в процессы межмолекулярного взаимодействия между асфальтевыми молекулами, стабилизируя их коллоидное состояние.

Согласно литературным данным [2,3], глубокие эвтектические растворители способны разрушать π – π взаимодействия между ароматическими ядрами асфальтенов и образовывать водородные связи с их полярными функциональными группами (–ОН, –СООН, –NH–). Компоненты ГЭР на основе бетаина выполняют двойную функцию — полярный катионный фрагмент взаимодействует с электронодонорными участками молекул асфальтенов, а гидроксильные и карбоксильные группы способствуют формированию водородных связей с донорно-акцепторными центрами. В результате молекулы асфальтенов частично «экранируются» растворителем, теряя способность к плотному π – π стэкингу, что предотвращает образование крупных агрегатов.

Таким образом, эффективность бетаин-содержащего ГЭР обусловлена совокупным действием водородного связывания, полярного экранирования и стерической стабилизации, препятствующих коагуляции асфальтенов. Это

согласуется с результатами измерений вязкости и УФ-спектроскопии, согласно которым добавление ГЭР снижает степень агломерации и обеспечивает формирование устойчивой коллоидной системы.

4. Заключение

По результатам проведённого исследования был синтезирован глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина и изучена его эффективность в качестве ингибитора осаждения асфальтенов. Научная новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении влияния ГЭР на процесс агрегации асфальтенов с использованием метода УФ-спектроскопии и в выявлении закономерности смещения точки начала осаждения при изменении соотношения н-гептан/толуол. Установлено, что введение ГЭР способствует снижению степени агломерации асфальтенов и стабилизации коллоидной системы, что отражается в уменьшении интенсивности УФ-поглощения.

В ходе работы из нефти Каражанбасского месторождения был экстрагирован асфальтен, после чего приготовлена модельная система с использованием толуола. Полученный растворитель показал способность замедлять процессы агрегации и выпадения асфальтенов, что подтверждено результатами УФ-спектроскопии.

Практическая значимость исследования состоит в том, что использование глубоких эвтектических растворителей, созданных на основе биосовместимых и доступных компонентов, позволяет повысить эффективность стабилизации нефти и снизить риск образования отложений в промысловых и транспортных условиях. Такие ингибиторы обладают «зелёным» характером, что уменьшает экологическую нагрузку и одновременно повышает надёжность технологического оборудования. Таким образом, глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина может быть рекомендован для применения в нефтяной промышленности с целью стабилизации нефти, увеличения срока службы оборудования и уменьшения экологических рисков.

Финансирование и благодарность: Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26194947, грант «Экологически чистые глубокие эвтектические растворители как новые инновационные ингибиторы осаждения асфальтенов»).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

АСФАЛЬТЕННІҢ ТҮНУЫН ЖАҢА ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕР АРҚЫЛЫ ТҰРАҚТАНДЫРУ

*К.А. Садықов¹ С.Б. Рыспаева², А.Ж. Керимкулова², Ш.С. Ислам²,
К. Маратқызы², Е. Арыслан²*

¹«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, КеАҚ, Алматы, Қазақстан

Түйіндеме. *Kіріспе.* Мұнай өндіру мен тасымалдау үдерістеріндегі ең күрделі мәселелердің бірі – асфальтендердің агрегациясы мен тұнуы. Бұл құбылыс құбырлар мен жабдықтарда қатты шөгінділердің пайда болуына әкеліп, өндіріс тиімділігін төмендетеді. Асфальтендердің тұнуын болдырмау – мұнай жүйелерінің тұрақтылығын және экологиялық қауіпсіздігін арттырудың маңызды міндеті болып табылады.

Жұмыстың мақсаты: Бетаин негізіндегі терең эвтектикалық еріткіштердің (ТЭЕ) асфальтендердің агрегациясы мен тұнуын тежеу қабілетін зерттеу.

Нәтижелер мен талқылаулар: Бетаин негізінде синтезделген ТЭЕ Каражанбас кен орнының мұнайынан алынған асфальтендерді қамтитын модельдік жүйеде сыналды. Ультракүлгін спектроскопия әдісі арқылы ТЭЕ қосылғанда жұтылу қарқындылығы 40–45 %-ға төмендейтіні және тұну басталу нүктесі n-гептан/толуол қатынасы 1.0-ден 1.2-ге ығысатыны анықталды. Реологиялық зерттеулер жүйенің тұтқырлығының 78.2-ден 45.6 МПа·с-қа дейін төмендегенін көрсетті, бұл асфальтендердің агрегация дәрежесінің азайғанын дәлелдейді. **Қорытынды:** Бетаин негізіндегі терең эвтектикалық еріткіш асфальтендердің «жасыл» ингибиторы ретінде жоғары тиімділік көрсетті. Алынған нәтижелер мұндай қосылыстарды мұнай өндіру және тасымалдау кезінде жабдықтардың қызмет ету мерзімін ұзарту мен қоршаған ортаға теріс әсерін азайту мақсатында қолданудың болашағын растайды.

Түйін сөздер: асфальтен, терең эвтектикалық еріткіш, ингибитор, мұнай, пропиленгликоль, бетаин, ультракүлгін (УК) спектрофотометр.

Садықов Қанат Амиркулович	<i>химия ғылымдарының магистрі</i>
Рыспаева Салимат Букенкызы	<i>жаратылыстану ғылымдарының магистрі</i>
Керимкулова Айгүл Жадраевна	<i>химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор</i>
Ислам Шолпан Сапарбайқызы	<i>PhD</i>
Маратқызы Камила	<i>Қ.И. Сатбаев атындағы ҚазҰТЗУ нің магистранты</i>
Арыслан Ерұлан	<i>Қ.И. Сатбаев атындағы ҚазҰТЗУ нің магистранты</i>

References

1. Rahmalia W., Shofiyani A., Sutiknyawati Y., Septiani S. Simple Green Routes for Metal-Bixin Complexes Synthesis Using Glycerol-Based Deep Eutectic Solvent. *Indones. J. Chem.*, **2022**, No.6, 22, 1759. DOI: 10.22146/ijc.76759
2. Sanati A., Malayeri M.R. Hydrophobic Deep Eutectic Solvent and Glycolipid Biosurfactant as Green Asphaltene Inhibitors: Experimental and Theoretical Studies. *Energy Fuels*, **2021**, No. 35(6), 4791–4802. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03922
3. Kumar N., Mohan M., Smith J.C., Simmons B.A., Singh S., Banerjee T. Inhibition of asphaltene aggregation using deep eutectic solvents: COSMO-RS calculations and experimental validation. *J. Mol. Liq.*, **2024**, No. 400, 124471. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.124471
4. Orrego-Ruiz J.A., García R., Cundar Paredes C.D., Rojas-Ruiz F.A. Characterization of Acid Species in Asphaltene Fractions by FT-ICR-MS and Infrared Spectroscopy. *Energy & Fuels*, **2022**, No. 36(24), 14852–14864. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03219
5. Hebbar A., Debraj D., Acharya S., Vatti P.K., Dey P., et al. Deep Eutectic Solvents Interaction with Asphaltenes: A Combined Experimental and Molecular Dynamics Study. *Journal of Molecular Liquids*, **2023**, No. 387, 122627. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122627
6. Ryspaeva S., Kerimkulova A., Rafikova K., Nauryzova S., Islam S., Aydemir M., Kozhaisakova M. Deep Eutectic Solvents for Sustainable Management of Asphaltene Deposition in Oil Production. *Engineered Science*, **2024**, No. 29, 1102. DOI: 10.30919/es1102
7. Sanati A., Malayeri M.R., Busse O., Weigand J.J., Beckmann M. Surface Energy and Wetting Behavior of Dolomite in the Presence of Carboxylic Acid-Based Deep Eutectic Solvents. *Langmuir*, **2022**, No. 38(50), 15622–15631. DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c02312

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN AND 4-CHLOROBENZALDEHYDE-BASED SCHIFF BASES AND ASSESSMENT OF THE ANTIMICROBIAL PERFORMANCE OF DERIVED HYDROGELS

D. Mukhamediya¹, D.N. Makhayeva^{1*}, D. Abduletip¹, G.K. Abilova²,
D.B. Kaldybekov¹, G.S. Irmukhametova¹

¹al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² NJSC "K.Zhubanov Aktobe regional university", Aktobe, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: danelya.1993@gmail.com

Abstract. *Introduction.* Microbial resistance to antibiotics is a major global health challenge, as the growing number of multidrug-resistant pathogens limits treatment options and increases morbidity and mortality. This situation necessitates the development of eco-friendly and effective alternatives, including novel antibacterial agents. Schiff bases—organic compounds with an imine group ($>C=N-$)—are promising due to their simple synthesis, structural diversity, and broad biological activities, including antimicrobial effects. Of particular interest are Schiff bases derived from chitosan, a natural polymer known for its biocompatibility, non-toxicity, and high potential for chemical modification, which can improve its physicochemical and biological properties for applications in medicine and biotechnology. *This study aimed to synthesise Schiff bases based on chitosan and 4-chlorobenzaldehyde and to evaluate their structural and functional properties.* The compounds were characterised by IR and NMR spectroscopy, and their properties were studied using thermal analysis, rheological measurements, and assessment of adhesive behaviour. *Results and Discussion.* The formation of Schiff bases was confirmed by IR and NMR spectroscopy. Thermal analysis showed increased glass transition temperature and thermal stability of the samples. Hydrogels prepared from methylcellulose and modified chitosan exhibited thixotropic behaviour and significant antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans*. *Conclusion.* Modified chitosan demonstrated improved properties and strong antimicrobial activity, indicating its potential as a basis for creating new antimicrobial materials for use in medicine, cosmetology, and the food industry.

Keywords: Schiff bases; chitosan; 4-chlorobenzaldehyde; hydrogels; antibacterial activity; adhesive properties.

Mukhamediya Dayana

Master of Technical Sciences, engineer;
E-mail: mukhamediya@danielliparm.kz

Makhayeva Danelya Nurlanovna

PhD, senior researcher; E-mail: danelya.1993@gmail.com

Abduletip Dilkhumar

PhD student; E-mail: abduletipovad@gmail.com

Citation: Mukhamediya D., Makhayeva D.N., Abduletip D., Abilova G.K., Kaldybekov D.B., Irmukhametova G.S. Development and characterization of chitosan and 4-chlorobenzaldehyde-based schiff based and assessment of the antimicrobial performance of derived hydrogelss. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 128-137. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.56>

Abilova Guzel Kabiletovna	PhD, senior lecturer; E-mail: guzelab82@mail.ru
Kaldybekov Daulet Bolatovich	PhD, leading researcher; E-mail: dauletkchem@gmail.com
Irmukhametova Galiya Serikbayevna	Candidate of Chemical Sciences, Professor; E-mail: galiya.irm@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ ОСНОВАНИЯ ШИФФА НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА И 4-ХЛОРБЕНЗАЛЬДЕГИДА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТИ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

Д. Мұхамедия¹, Д.Н. Махаева^{1}, Д.Абдулетип¹, Г.К.Абилова²,
Д.Б. Калдыбеков¹, Г.С. Ирмухаметова¹*

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

Резюме. *Введение.* Устойчивость микроорганизмов к антибиотикам представляет собой одну из наиболее серьезных глобальных проблем здравоохранения. Постоянный рост числа патогенов с множественной лекарственной устойчивостью существенно ограничивает терапевтические возможности, повышает заболеваемость и смертность. В связи с этим особую актуальность приобретает поиск экологичных и эффективных альтернативных подходов, включая разработку новых антибактериальных агентов. Одним из перспективных направлений являются основания Шиффа — органические соединения, содержащие иминную группу ($>C=N-$). Они привлекают внимание исследователей благодаря простоте синтеза, разнообразию структуры и широкому спектру биологических активностей, в том числе выраженным антимикробным свойствам. Особый интерес вызывают основания Шиффа на основе хитозана — природного полимера, обладающего биосовместимостью, биоактивностью, нетоксичностью и высокой способностью к химической модификации. Модификация хитозана позволяет улучшить его физико-химические и биологические характеристики, расширяя области применения в медицине, фармацевтике и биотехнологии. *Цель исследования* заключалась в синтезе оснований Шиффа на основе хитозана и 4-хлорбензальдегида, а также в изучении их структурных и функциональных свойств. *Методология работы* включала характеристику синтезированных соединений методами ИК- и ЯМР-спектроскопии, а также оценку физико-химических свойств посредством термического анализа, реологических исследований и изучения адгезионного поведения. *Результаты и обсуждение.* Были синтезированы основания Шиффа, образование которых подтверждено ИК- и ЯМР-спектроскопией. Термический анализ показал повышение температуры стеклования и термостабильности образцов. Гидрогели на основе метилцеллюлозы и модифицированного хитозана проявили тиксотропные свойства и антимикробную активность против *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Candida albicans*. *Заключение.* Результаты исследования демонстрируют перспективность модифицированного хитозана как основы для создания новых антимикробных материалов с потенциалом применения в медицине, косметологии и пищевой промышленности.

Ключевые слова: основания Шиффа; хитозан; 4-хлорбензальдегид; гидрогели; антибактериальная активность; адгезивные свойства.

Мухамедия Диана	Магистр технических наук, инженер
Махаева Данэля Нурлановна	PhD, старший научный сотрудник
Абдулетип Дильхумар	PhD студент
Абилова Гузель Кабилетовна	PhD, старший преподаватель
Калдыбеков Даулет Болатович	PhD, ведущий научный сотрудник
Ирмухаметова Галия Серикбаевна	к.х.н., профессор

1. Введение

Устойчивость микроорганизмов к антибиотикам — серьёзная угроза здравоохранению, так как число штаммов с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ) быстро растёт, что ограничивает лечение и повышает смертность [1]. Поэтому актуален поиск экологически безопасных антибактериальных агентов.

Основания Шиффа — органические соединения с иминной группой ($>C=N-$), применяемые как пигменты, катализаторы, стабилизаторы полимеров, хемосенсоры, а также в фармацевтике и биомедицине [2]. Их популярность связана с простым и дешёвым синтезом, в частности термическим методом.

Хитозан — продукт деацетилирования хитина, обладающий сорбционными и увлажняющими свойствами и нетоксичностью [3]. Благодаря реакционноспособным группам ($-OH$, $-NH_2$) он легко модифицируется, сохраняя биоразлагаемость и приобретая антимикробные, противоопухолевые и противовирусные свойства [4]. Производные Шиффа на основе хитозана проявляют активность против *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и грибов (*Candida albicans*), что делает их перспективными для пищевой, медицинской и косметической сфер [5].

Цель исследования — синтез оснований Шиффа на основе хитозана и 4-хлорбензальдегида, их характеристика и изучение антибактериальных, реологических и адгезивных свойств гидрогелей.

2. Экспериментальная часть

2.1 Материалы

В работе использовались 4-хлорбензальдегид, хитозан, метилцеллюлоза-40000 (вязкость 400 сР), молочная кислота (85%, Sigma Aldrich), гидроксид натрия (NaOH, Лабхимпром) и этиловый спирт (90%, «Талгар-Спирт»). Все реагенты применялись без дополнительной очистки.

2.2 Получение модифицированного хитозана

Хитозан (1,0 г) ($C=2\%$) (ХТ) растворяли в 50 мл 2%-ного раствора молочной кислоты при перемешивании в течение 6 ч при комнатной температуре. К полученному раствору по каплям добавляли 10 мл этанола, содержащего рассчитанное количество 4-хлорбензальдегида (ХБА). Реакцию проводили при различных мольных соотношениях хитозана и альдегида — 1.6:1, 1:1, 1:2 и 1:3 (ХТ-ХБА) — при температуре 50 °C в течение 6 ч. pH реакционной среды находился в пределах 2,2–2,3. Осадок продукта выделяли добавлением 5%-ного раствора NaOH, после чего фильтровали и многократно промывали водой и этанолом до полного удаления непрореагировавшего альдегида. Полученный продукт высушивали в лиофильной сушке до получения белого порошка основания Шиффа на основе хитозана и 4-хлорбензальдегида.

2.3 Получение гидрогелей на основе основания Шиффа

Модифицированный хитозан ХТ-ХБА (0,2 г, соотношение 1:2 моль/моль) растворяли в 10 мл 2%-ного раствора молочной кислоты. Отдельно готовили 7,5%-ный водный раствор метилцеллюлозы. Для формирования гидрогеля растворы смешивали в соотношении 1:3 (масс. % соответственно). Полученную массу нейтрализовали до pH 5,0 путём капельного добавления 0,5 М раствора NaOH.

2.4 Физико-химические методы анализа

ИК-спектроскопия. Для физико-химической характеристики синтезированных оснований Шиффа использовался спектрометр a Vertex 70 V spectrometer. Пробы хитозана и ХТ-ХБА, полученные при мольных соотношениях 1.6:1, 1:1 и 1:3, подвергали лиофильной сушке до постоянной массы, после чего ИК-спектры регистрировали для сухих образцов.

ЯМР-спектроскопия. ЯМР-спектры соединений на основе хитозана и основания Шиффа ХТ-ХБА регистрировались на спектрометре JNM-ECA с рабочей частотой 500 МГц (Boston, MA, USA); образцы готовили в 0,5% растворе дейтерированной воды (D₂O).

Термогравиметрический анализ (ТГА). Анализ проводили на приборе SKZ1053 TGA с использованием навесок массой около 8 мг. Измерения выполняли при нагреве со скоростью 10 °С/мин в интервале температур 25–600 °С в атмосфере азота.

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Анализ проводили на приборе SKZ1052B DSC с использованием навесок массой около 8 мг. Измерения выполняли при нагреве со скоростью 10 °С/мин в интервале температур 25–600 °С в атмосфере воздуха.

Реологические характеристики гидрогелей оценивались с помощью ротационного вискозиметра Lamy Rheology RM 200 (Lamy Rheology Instruments (Франция)).

Антимикробную активность образцов против *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Candida albicans* исследовали диско-диффузионным методом в «Научном центре противоиных препаратов» (г. Алматы). Диаметры зон ингибирования определяли в мм, результаты представляли как среднее $\pm$ стандартное отклонение (n=3).

Адгезивные свойства гидрогелей ХТ-ХБА, раствора хитозана и NaFl (0,01 мг/мл) оценивали на поверхности свиного уха. Моделирование мытья рук проводили с подачей дистиллированной воды (190 мл/ч), а потоотделения — 0,09% раствора NaCl (25 мл/ч) [6]. Флуоресценцию регистрировали камерой iPhone 13 Pro при УФ-освещении и анализировали в ImageJ®, корректируя данные по фону для объективной оценки.

3. Результаты и их обсуждение

Синтез оснований Шиффа на основе хитозана и 4-хлорбензальдегида

Производные хитозана широко применяются в биомедицине и фармацевтике благодаря своим уникальным свойствам. Однако его прямое использование ограничено низкой стабильностью [7]. Эту проблему решают путем модификации хитозана с образованием оснований Шиффа.

В данной работе основания Шиффа на основе хитозана (ХТ) и 4-хлорбензальдегида (ХБА) синтезировали термическим способом. Использовались различные мольные соотношения компонентов: 1,6:1, 1:1, 1:2 и 1:3 (ХТ-ХБА). Взаимодействие между полимером и альдегидом осуществляется за счёт функциональных групп: аминогрупп хитозана и карбонильных групп ХБА. На ИК-спектрах ХТ и ХТ-ХБА в соотношениях 1,6:1, 1:1 и 1:3 моль/моль, представленных на рисунке 1 (а), обнаружены характерные различия, отражающие успешную модификацию. На спектрах ХТ-ХБА появляется и нарастает полоса $\sim 1640\text{--}1690\text{ см}^{-1}$, что свидетельствует об формировании имино-групп ($>\text{C}=\text{N}-$) в результате образования основания Шиффа.

Анализ ^1H -ЯМР-спектров (рис.1 (б)) модифицированного хитозана с хлорбензальдегидом (ХТ-ХБА) показывает наличие схожих структурных фрагментов и подтверждает образование оснований Шиффа. В обоих случаях в спектрах наблюдаются сигналы в области 9,45 ppm для соотношений 1,6:1 и 1:2, и 9,50 ppm для 1:3, характерные для α -протона в иминной группе ($>\text{C}=\text{N}-$), что подтверждает успешное взаимодействие аминогрупп хитозана с альдегидом. Кроме того, наличие множественных сигналов в ароматической области спектра подтверждает включение ароматических колец: у ХТ-ХБА – в диапазоне 7,21–7,57 ppm.

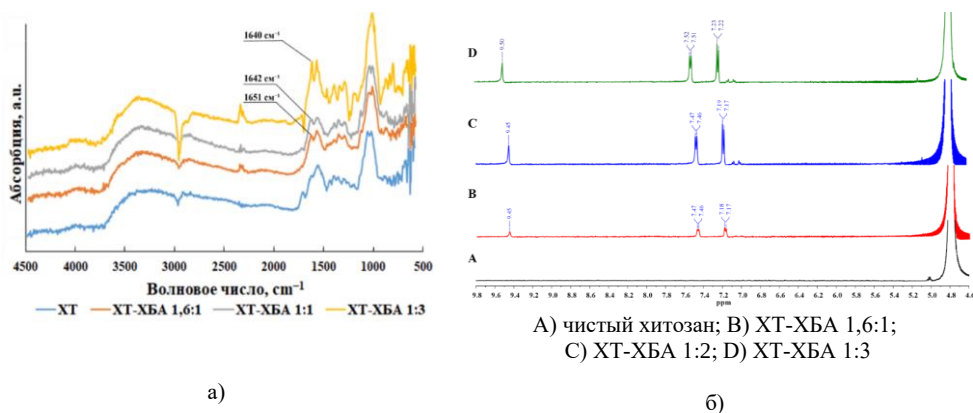


Рисунок 1 – ИК- (А) и ЯМР-спектры (Б) хитозана и его производных ХТ-ХБА при различных мольных соотношениях ХТ:ХБА.

На рисунке 2 (а) представлены результаты ТГА-анализа хитозана и его производных на основе основания Шиффа. При 300°C потеря массы не

модифицированного хитозана составила около 50 %, а потеря массы ХТ-ХБА 56.71 %. При 500 °С потеря массы не модифицированного хитозана составила около 6.72 %, а для производных хитозана ХТ-ХБА - 27.16 %. Таким образом, производные хитозана показали более высокую термическую стабильность, чем не модифицированный хитозан.

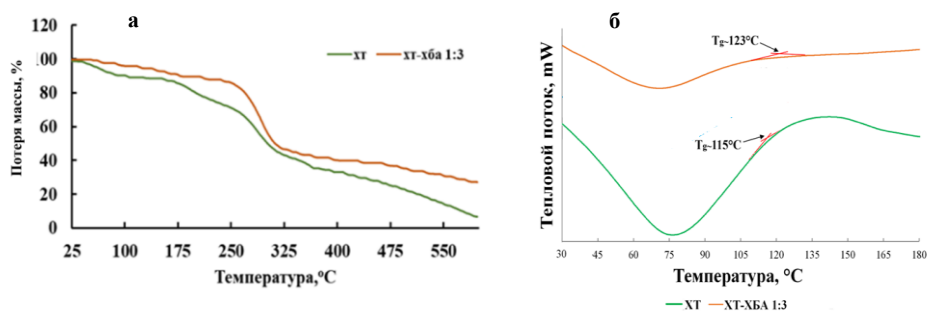
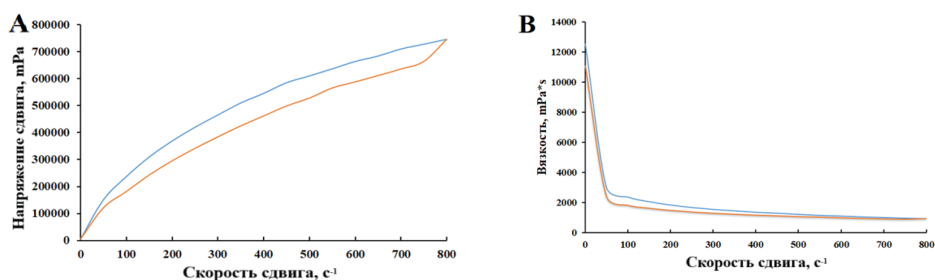


Рисунок 2 – Результаты ТГА (А) и ДСК (Б) анализа хитозана и ХТ-ХБА.

ДСК-анализ показал (рис. 2 (б)), что модификация хитозана 4-хлорбензальдегидом с образованием оснований Шиффа повышает его температуру стеклования (T_g) с ~ 115 °С до ~ 123 °С. Этот эффект связан с формированием жёстких иминных связей ($>C=N-$) и введением ароматических фрагментов, которые ограничивают подвижность полимерных цепей.

Результаты анализа структурно-механических свойств гидрогелей показали, что при увеличении скорости сдвига возрастает предельное напряжение сдвига и снижается эффективная вязкость (рис. 3). Построенные кривые течения выявили гистерезис, подтверждающий тиксотропные свойства образцов. Гидрогели ХТ-ХБА демонстрируют быстрое восстановление структуры, что обеспечивает их лёгкое нанесение и удобство использования.



А) кривая течения гидрогеля; В) кривая вязкости гидрогеля

Рисунок 3 - Результаты реологического анализа гидрогеля ХТ-ХБА [1:3].

Хитозан проявляет антимикробную активность против широкого спектра грамположительных и грамотрицательных бактерий, а также грибов, благодаря своей катионной природе [8]. 4-хлорбензальдегид усиливает это действие за счёт взаимодействия альдегидной группы с белками микроорганизмов и повышения проницаемости мембран [9-10]. Основания Шиффа на основе хитозана и 4-хлорбензальдегида показали более высокую активность по сравнению с чистым хитозаном, образуя зоны ингибирования 6,3 мм (*E. coli*), 7,7 мм (*S. aureus*) и 8,0 мм (*C. albicans*) (рис.4). Это подтверждает их потенциал как эффективных антибактериальных средств.

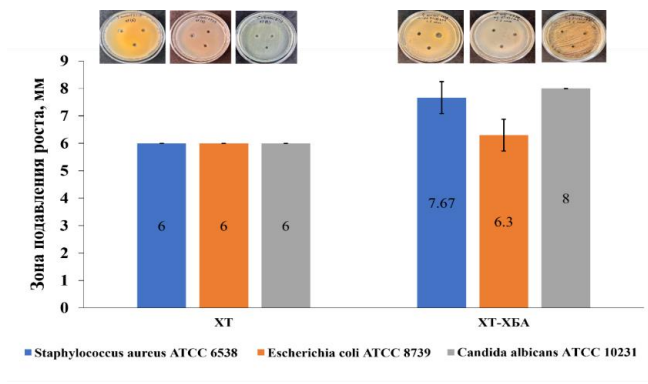


Рисунок 4 – Результаты анализа антимикробных свойств гидрогеля на основе хитозана и ХТ-ХБА, 1:3 моль/моль.

Адгезивные свойства гидрогелей оценивали на модели свиной кожи с использованием флуоресцентной визуализации и анализа в ImageJ®. Результаты (рис. 5–6) показали, что ХТ и особенно ХТ-ХБА обладают значительно более высокой удерживающей способностью по сравнению с контрольным образцом NaFl. При воздействии воды ХТ сохранял 30–35% удерживания при объеме смывной жидкости 20–25 мл, тогда как ХТ-ХБА удерживал до 60% при 15 мл и около 40% при 20 мл, что подтверждает улучшение адгезии после модификации.

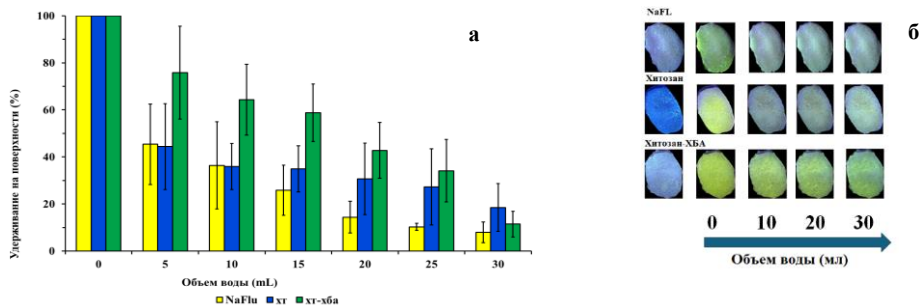


Рисунок 5 – Удержание хитозана и ХТ-ХБА после промывания водой (а) и флуоресцентные изображения, демонстрирующие их адгезию к свиному уху (б).

При промывании раствором NaCl гель на основе ХТ-ХБА сохранял наибольшее удерживание – около 55–60% при объеме смывной жидкости 10 мл и ~30% при 30 мл, в то время как ХТ удерживал 35–40% и 15–20%, соответственно. Контрольный образец с NaFlu быстро смывался, показывая значение ниже 10% уже при 20 мл. Флуоресцентные изображения подтверждают более высокую устойчивость модифицированного хитозана к смыванию по сравнению с чистым ХТ и контролем.

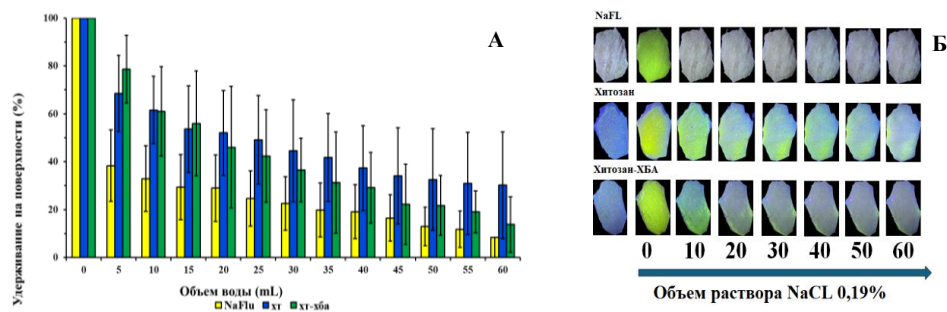


Рисунок 6 – Удержание хитозана и ХТ-ХБА после промывания раствором NaCl и флуоресцентные изображения их адгезии к свиному уху.

4. Заключение

В ходе работы были синтезированы и охарактеризованы ароматические основания Шиффа на основе хитозана (ХТ-ХБА). Модификация хитозана 4-хлорбензальдегидом привела к образованию прочных иминных связей, что подтверждено ИК-спектроскопией (характеристический пик при 1651 см^{-1}) и протонной ЯМР-спектроскопией, на котором зафиксированы сигналы, характерные для иминных протонов ($>\text{C}=\text{N}-$) и ароматических колец. Термический анализ показал повышение температуры стеклования и стабильности модифицированных образцов по сравнению с чистым хитозаном. Полученные гели проявили тиксотропные свойства и антимикробную активность против *E. coli*, *S. aureus* и *C. albicans*. Эксперименты на модели свиной кожи с флуоресцентной визуализацией показали, что чистый хитозан удерживается на кожной поверхности лучше, чем гель ХТ-ХБА, вероятно, за счёт более высокой вязкости. Эти результаты подтверждают перспективность ХТ-ХБА для применения в медицине и фармацевтике.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта ГФ МНВО РК на 2023-2025 гг. грант AP19679560, ПЦФ МНВО РК на 2024-2026 гг. грант № BR24993113.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов между авторами, требующего раскрытия в данной статье.

4-ХЛОРБЕНЗАЛЬДЕГИДПЕН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ХИТОЗАНДЫ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОДАН АЛЫНҒАН ГИДРОГЕЛЬДЕРДІҢ АНТИМИКРОБТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ

**Д. Мұхамедия¹, Д.Н. Махаева^{1*}, Д.Абдулети¹, Г.К.Абилова²,
Д.Б. Калдыбеков¹, Г.С. Ирмухаметова¹**

¹ *әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

² *Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан*

Түйіндеме. *Кіріспе.* Микроорганизмдердің антибиотиктерге төзімділігі қазіргі уақытта жаһандық денсаулық сақтау саласындағы ең өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Көптеген дәріге төзімді (ҚДТ) патогендердің санының тұрақты өсуі терапевтік мүмкіндіктерді айтарлықтай шектеп, аурушандық пен өлім-жітім деңгейінің жоғарылауына әкеледі. Осыған байланысты экологиялық таза әрі тиімді баламалы тәсілдерді, соның ішінде жаңа антибактериалды агенттерді іздеу ерекше маңызға ие. Перспективті бағыттардың бірі — Шифф негіздері, құрамында имин тобы ($>C=N-$) бар органикалық қосылыстар. Бұл қосылыстар синтезінің қарапайымдылығы, құрылымдық әртүрлілігі және кең ауқымды биологиялық белсенділігі, соның ішінде айқын антимикробтық қасиеттері арқасында ғалымдардың назарын аударуда. Хитозан негізіндегі Шифф негіздері ерекше қызығушылық тудырады, себебі хитозан — табиғи полимер, ол биосәйкестілігімен, биоактивтілігімен, уытсыздығымен және химиялық модификацияға жоғары бейімділігімен ерекшеленеді. Хитозанды модификациялау оның физика-химиялық және биологиялық қасиеттерін жақсартып, медицинада, фармацевтикада және биотехнологияда қолдану аясын кеңейтеді. *Зерттеудің мақсаты* хитозан мен 4-хлорбензальдегид негізінде ароматты Шифф негіздерін синтездеу және олардың құрылымдық әрі функционалдық қасиеттерін зерттеу болып табылады. *Жұмыс әдістемесі.* Синтезделген қосылыстарды сипаттау үшін ИҚ және ЯМР спектроскопия әдістері қолданылды, физика-химиялық қасиеттері термиялық талдау, реологиялық зерттеулер және адгезиялық қасиеттерін бағалау арқылы анықталды. *Нәтижелер және талқылау.* Шифф негіздерінің түзілуі ИҚ және ЯМР спектроскопиясы арқылы расталды. Термиялық талдау сынамалардың әйнектену температурасы мен термотұрақтылығының артқанын көрсетті. Метилцеллюлоза және модификацияланған хитозан негізіндегі гидрогельдер тиксотропиялық қасиеттерге ие болып, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* және *Candida albicans*-қа қарсы айқын антимикробтық белсенділік көрсетті. *Қорытынды.* Зерттеу нәтижелері модификацияланған хитозанның жаңа антимикробтық материалдарды жасау үшін негіз бола алатын перспективті биополимер екенін дәлелдеді, оның медицинада, косметологияда және тамақ өнеркәсібінде қолдану әлеуеті жоғары.

Түйінді сөздер: Шифф негіздері; хитозан; 4-хлорбензальдегид; гидрогельдер; бактерияға қарсы белсенділік; адгезивтік қасиеттер; көптекті дәріге төзімділік.

<i>Мухамедия Диана</i>	<i>Техникалық ғылымдар магистрі, инженер</i>
<i>Махаева Данэля Нурлановна</i>	<i>PhD, аға ғылыми қызметкер</i>
<i>Абдулети Дильхумар</i>	<i>докторант</i>
<i>Абилова Гузель Кабилетовна</i>	<i>PhD, аға оқытушы</i>
<i>Калдыбеков Даулет Болатович</i>	<i>PhD, жетекші ғылыми қызметкер</i>
<i>Ирмухаметова Галия Серикбаевна</i>	<i>х.ғ.к., профессор</i>

References

1. Bharadwaj, A., Rastogi, A., Pandey, S., Gupta, S., & Sohal, J. S. Multidrug-resistant bacteria: Their mechanism of action and prophylaxis. *BioMed Research International*, **2022**, Article 5419874. DOI:10.1155/2022/5419874
2. Wang, X., Zhang, Y., Zhang, T., et al. A novel triphenylamine-based bis-Schiff bases fluorophores with AIE-activity as the hydrazine fluorescence turn-off probes and cell imaging in live cells. *Talanta*, **2020**, 217, 121029. DOI:10.1016/j.talanta.2020.121029
3. Kumar, M. N. V. R., Muzzarelli, R. A. A., Muzzarelli, C., Sashiwa, H., & Domb, A. J. Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives. *Chemical Reviews*, **2004**, 104(12), 6017–6084. DOI:10.1021/cr030441b
4. Ahmed, T. A., & Aljaeid, B. M. Preparation, characterization, and potential application of chitosan, chitosan derivatives, and chitosan metal nanoparticles in pharmaceutical drug delivery. *Drug Design, Development and Therapy*, **2016**, 10, 483–507. DOI:10.2147/DDDT.S99651
5. Rafique, A., Khan, S. A., Ullah, R., & Bhatti, H. N. Chitosan functionalized poly(vinyl alcohol) for prospects biomedical and industrial applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **2016**, 87, 141–154. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2016.02.066
6. Baker, L. B. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature*, **2019**, 6(3), 211–259. <https://doi.org/10.1080/23328940.2019.1632145>
7. Szymańska, E., & Winnicka, K. Stability of chitosan—a challenge for pharmaceutical and biomedical applications. *Marine Drugs*, **2015**, 13(4), 1819–1846. DOI:10.3390/md13041819
8. Dhlamini, K. S., Kumar, R., Moutloali, R. M., & Mhlongo, G. H. Reimagining chitosan-based antimicrobial biomaterials to mitigate antibiotic resistance and alleviate antibiotic overuse: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, **2024**, 309(9), 2400018. DOI:10.1002/mame.202400018
9. Mohamed, M. A., Benjamin, I., Okon, G. A., Ahmad, I., Khan, S. A., Patel, H., Agwamba, E. C., & Louis, H. Insights into in-vitro studies and molecular modelling of the antimicrobial efficiency of 4-chlorobenzaldehyde and 4-methoxybenzaldehyde derivatives. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, **2024**, 42(1), 6042–6064. DOI:10.1080/07391102.2023.2258589
10. Fontana, R., Marconi, P. C. R., Caputo, A., & Gavalyan, V. B. Novel chitosan-based Schiff base compounds: Chemical characterization and antimicrobial activity. *Molecules*, **2022**, 27(9), 2740. DOI:10.3390/molecules27092740

REGIOSELECTIVE HYDROALKOXYCARBONYLATION OF 1,3-BUTADIENE, 1,5-HEXADIENE, AND 1,7-OCTADIENE USING PALLADIUM-PHOSPHINE CATALYTIC SYSTEMS

A.M. Azimbay^{1*}, N.Zh. Kudaibergenov^{1,2}, K.M. Shalmagambetov¹,
A.E. Alikeyeva¹, Z. Bakytzhan¹, M. Kh. Zykai¹

¹Center of Physicochemical Methods of Research and Analysis at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Department of Chemistry, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: azimbayevabzal01@gmail.com

Abstract: Hydroalkoxycarbonylation of dienes offers a straightforward and atom-economic route to valuable esters derived from simple unsaturated feedstocks and carbon monoxide. In this work, we investigated the regioselective hydroalkoxycarbonylation of three representative substrates: 1,3-butadiene, 1,5-hexadiene, and 1,7-octadiene, using palladium-phosphine catalysts in ethanol at 120°C under 2.5 MPa CO. Two catalysts, [PdCl₂(PPh₃)₂] and [Pd(PPh₃)₄], were tested in combination with additional PPh₃ and p-toluenesulfonic acid. Across all three dienes, the reactions consistently favored formation of the linear ester, with yields increasing as the diene chain length grew and conjugation decreased: from 2.31% for ethyl 4-pentenoate (from 1,3-butadiene) up to 32.08% for ethyl 8-nonenoate (from 1,7-octadiene). The superior performance of Pd(PPh₃)₄ compared with PdCl₂(PPh₃)₂ highlights the importance of electron-rich Pd(0) species in stabilizing acyl intermediates and sustaining catalytic turnover. These findings not only clarify how catalyst structure and substrate features influence reactivity in diene hydroalkoxycarbonylation but also provide practical guidance for tailoring conditions to enhance linear selectivity. Such insights expand the synthetic potential of this methodology for producing C₅-C₁₀ esters relevant to polymer, plasticizer, fragrance, and fine-chemical applications.

Keywords: alkadienes, hydroalkoxycarbonylation, palladium catalysts, ethyl esters, regioselectivity

Azimbay Abzal Meirembekuly	Master of Engineering Sciences; Email: azimbayevabzal01@gmail.com
Kudaibergenov Nurbolat Zharylkasynuly	Associate Professor; Email: n.zh.kudaibergenov@gmail.com
Shalmagambetov Kairzhan Mustafinovich	Doctor of Chemical Sciences; Email: kairshan@yandex.ru
Alikeyeva Alua Erzhanovna	PhD student; Email: alua.alikeyeva@gmail.ru
Bakytzhan Zarrina	PhD student; Email: Zarrina_bakytzhan@mail.ru
Zykai Meruyert Khalykkyzy	Senior Researcher; Email: mzykay@mail.ru

Citation: Azimbay A.M., Kudaibergenov N.Zh., Shalmagambetov K.M., Alikeyeva A.E., Bakytzhan Z., Zykai M.Kh. Regioselective hydroalkoxycarbonylation of 1,3- butadiene, 1,5- hexadiene, and 1,7- octadiene using palladium-phosphine catalytic systems. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 138-148. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.57>

1. Introduction

Carbonylation reactions are widely applied for the direct synthesis of carboxylic acid derivatives from unsaturated compounds in the presence of carbon monoxide. Among them, hydroalkoxycarbonylation involves the addition of an alcohol and CO across a C=C bond under palladium catalysis. This transformation provides an efficient route to unsaturated esters and diesters and is valued for its high atom economy, broad substrate scope, and simple reaction setup. The resulting products are used as solvents and as intermediates for polymers, plasticizers, and fine chemicals. Recent work has also focused on improving the environmental profile of hydroalkoxycarbonylation, for example by employing formic acid as an in-situ source of CO [1].

1,3-Dienes and non-conjugated dienes are challenging substrates for hydroalkoxycarbonylation. The presence of two C=C bonds allows several competing pathways, including mono- and bis-carbonylation, 1,2- or 1,4-addition, formation of linear or branched esters, and intramolecular cyclo(oxy)carbonylation. At the same time, these systems are prone to double-bond migration and to alternative insertion sequences. High selectivity therefore requires careful choice of catalyst and reaction medium to control oxidative addition, migratory insertion, and nucleophile attack [2,3].

For 1,3-butadiene, both early and recent studies have shown that Pd-phosphine catalysts promote regioselective mono-hydroalkoxycarbonylation to give 3-alkenoate esters such as methyl 3-pentenoate via η^3 -allyl-palladium intermediates. Mechanistic investigations identified crotylpalladium complexes and clarified the sequence of oxidative addition, CO insertion, and nucleophilic attack, demonstrating that ligand steric and electronic properties and the reaction medium determine which allyl fragment undergoes carbonylation. Later work revealed that solvent and ligand effects, including the use of bulky bisphosphines like dtbpx, can strongly influence selectivity in diene carbonylations. In parallel, dicarbonylation of butadiene has been explored as a direct approach to adipate diesters, compounds relevant to adipic-acid production. Recent mechanistic analyses have even suggested refinements to the classic mono-hydroalkoxycarbonylation pathway, emphasizing the role of basic additives and off-cycle equilibria. These findings highlight both the synthetic utility and the unresolved challenges of achieving full regio- and chemoselective control in the carbonylation of conjugated dienes [4–6].

In contrast, non-conjugated dienes such as 1,5-hexadiene and 1,7-octadiene present distinct patterns of reactivity and selectivity. Early investigations showed that 1,5-hexadiene can undergo regioselective cyclocarboxylation under Pd/PPh₃ catalysis in alcoholic media to give oxa- and carbocyclic products bearing ester groups. Subsequent studies revealed that variations in CO pressure and the nature of the nucleophile can shift the outcome between acyclic mono- or diesters and cyclized products, reflecting competition between intramolecular trapping of allyl-palladium intermediates and linear chain growth. Although these C₆ and C₈ dienes are valuable industrial feedstocks, systematic data on the

hydroalkoxycarbonylation regioselectivity of 1,5-hexadiene and 1,7-octadiene with phosphine-ligated palladium catalysts remain limited, indicating the need for further detailed investigation [7,8].

Across both conjugated and non-conjugated dienes, the nature of the phosphine ligand and the reaction medium are key factors governing reactivity and selectivity. Bulky, strongly donating bisphosphines such as dtbpx can promote hydroalkoxycarbonylation under acid-free conditions for conjugated substrates, whereas monodentate systems based on PPh_3 typically require Brønsted or Lewis acids (for example, *p*-toluenesulfonic acid or AlCl_3) to enhance catalyst turnover and influence the site of insertion. More recent work has optimized Hemaraphos-type ligands for the dicarbonylation of butadiene, with kinetic studies correlating ligand robustness to both activity and selectivity. The choice of solvent also plays a decisive role by affecting ion pairing, nucleophile reactivity, and the solubility of carbon monoxide, and can therefore shift the chemoselectivity observed in diene carbonylations [2,9,10].

Despite recent advances, achieving reliable control over regioselectivity in diene hydroalkoxycarbonylation remains difficult. Competing allyl- and alkyl-palladium pathways, reversibility of key elementary steps, and subtle interactions among solvent, acid, and ligand can direct the reaction toward linear or branched esters, mono- and dicarbonylation, or cyclized products. Computational and experimental studies indicate that several catalytic cycles may operate simultaneously even with simple alkenes, and that mechanistic insights from mono-olefin carbonylation cannot be directly extrapolated to 1,3-butadiene. These factors underscore the value of a systematic comparison of conjugated and non-conjugated dienes, ligand frameworks, acid co-catalysts, and solvents under unified reaction conditions [6,11].

In this work we present a comparative study of the regioselective hydroalkoxycarbonylation of 1,3-butadiene, 1,5-hexadiene, and 1,7-octadiene catalyzed by well-defined palladium-phosphine complexes. By varying the ligand environment (bidentate vs monodentate), the type of Brønsted or Lewis acid additive, and the alcohol combination, we examine how these factors influence product distribution and regioselectivity. The study identifies conditions that favor linear mono-hydroalkoxycarbonylation, such as 3-alkenoate formation from 1,3-butadiene, as well as conditions that lead to dicarbonylation or intramolecular cyclocarboxylation with non-conjugated dienes. These findings provide practical guidance for controlling selectivity in diene carbonylations and demonstrate efficient access to $\text{C}_5\text{-C}_{10}$ ester intermediates under straightforward, scalable conditions.

2. Experimental part

1,3-butadiene, 1,5-hexadiene, 1,7-octadiene, triphenylphosphine (PPh_3), *p*-toluenesulfonic acid (*p*-TsOH), $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$, and $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ were purchased from MERYER Chemical Technology Co. and used without further purification.

Carbon monoxide (supplied in cylinders) was employed without additional purification.

Hydroalkoxycarbonylation reactions were performed in a 100 mL stainless-steel autoclave equipped with a magnetic stirrer, CO inlet and outlet valves, pressure gauges, an electric heater, and a thermoregulator. The setup allowed for repeated purging of the reaction volume with CO and precise control of temperature and pressure. After charging the autoclave with the corresponding alkadiene, ethanol, palladium catalyst ($\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ or $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$), additional PPh_3 , and *p*-TsOH, the reactor was sealed and purged three times with carbon monoxide. The system was then pressurized with CO to 2.5 MPa and heated with stirring to 120°C. The reactions were maintained at this temperature and pressure for 5 h. After completion, the autoclave was cooled to room temperature and depressurized.

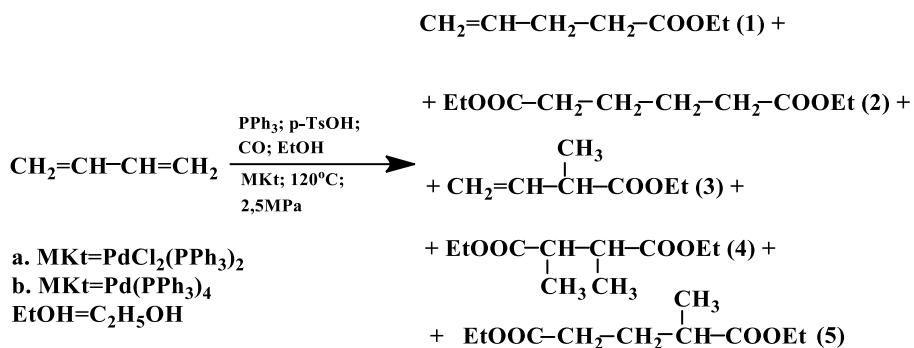
In each case of hydroalkoxycarbonylation of 1.3-butadiene, 1.5-hexadiene, and 1.7-octadiene, the autoclave was charged at room temperature with $3.31 \cdot 10^{-2}$ mol of alkadiene (1.79 g of 1.3-butadiene, 2.71 g of 1.5-hexadiene and 3.64 g of 1.7-octadiene), 0.761 g ($1.65 \cdot 10^{-2}$ mol) of ethanol, 0.026 g ($3.8 \cdot 10^{-5}$ mol) of $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ (or an equimolar amount of $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$), 0.060 g ($2.28 \cdot 10^{-4}$ mol) of PPh_3 , and 0.058 g ($7.06 \cdot 10^{-4}$ mol) of *p*-TsOH, corresponding to a molar ratio of $[\text{alkadiene}]:[\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}]:[\text{Pd}]:[\text{PPh}_3]:[\text{p-TsOH}] = 870:435:1:6:9$.

Product compositions were analyzed on an Agilent 7890A gas chromatograph equipped with an Agilent 5975C mass-selective detector (Santa Clara, CA, USA). Helium served as the carrier gas. Injection was performed at 300°C with a split ratio of 1000:1. The oven program started at 40 °C (hold 1 min), then increased at 5 °C min⁻¹ to 250°C and held for 1 min, giving a total run time of 44 min. Detection was carried out in electron-impact mode. Separation employed an HP-FFAP capillary column with a nitroterephthalic acid-polyethylene glycol stationary phase.

3. Results and discussion

The hydroalkoxycarbonylation of 1.3-butadiene, 1.5-hexadiene, and 1.7-octadiene with ethanol and CO was investigated using two palladium-based catalytic systems: $[\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2]:\text{PPh}_3:\text{p-TsOH}$ and $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4]:\text{PPh}_3:\text{p-TsOH}$. Across all substrates, we observed a consistent preference for linear over branched esters, with activity increasing from the conjugated diene (1.3-butadiene) to the non-conjugated dienes (1.5-hexadiene and 1.7-octadiene).

Hydroalkoxycarbonylation of 1.3-butadiene. 1.3-butadiene afforded a mixture of five possible products: two linear esters (ethyl 4-pentenoate (1) and ethyl 2-methyl-3-butenate (2)) and three branched products (diethyl 2-methyl-pentanedioate (3), diethyl 2,3-dimethylbutanedioate (4), diethyl hexanoate (5)):



From the chromatograms obtained, it was found that the hydroalkoxycarbonylation of 1,3-butadiene in the presence of $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ and $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ catalysts yielded predominantly ethyl 4-pentenoate with 1.69% and 2.31% yields, respectively. Minor amounts of ethyl 2-methyl-3-butenate (0.03% and 0.02%), diethyl 2-methyl-pentanedioate (0.01% and 0.03%), and diethyl hexanoate (0.02% and 0.023%) were also detected, while diethyl 2,3-dimethylbutanedioate was not observed under the applied reaction conditions. (Table 1). The low absolute yields are consistent with the known lower reactivity of conjugated dienes in PPh_3 /acid media and with the susceptibility of such systems to off-cycle palladium deactivation (e.g., Pd black formation) under strongly protic/acidic conditions. In contrast, tailored bisphosphine ligands and appropriate solvent choice can dramatically elevate both conversion and selectivity. For example, Yang and co-workers demonstrated that with dtbpx ligation the dicarbonylation of 1,3-butadiene to adipate diesters proceeds with up to 97% selectivity and high yield in toluene, whereas the same catalyst in methanol strongly suppresses the first carbonylation cycle, an illustrative solvent switch between mono- and bis-carbonylation regimes. Their data also show that in toluene the monocarbonylation intermediate is only detectable in trace amounts, indicating fast turnover to the diester under these conditions [5].

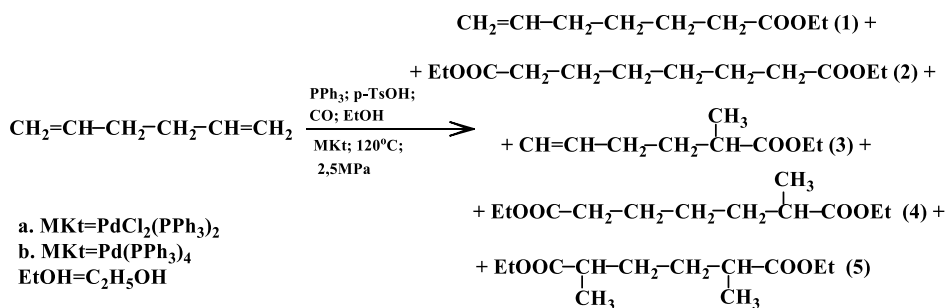
Table 1 – Product yield of the reaction of hydroalkoxycarbonylation of butadiene-1,3

Product	with $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ cat. product yield, %	with $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ cat. product yield, %
ethyl 4-pentenoate	1.69	2.31
ethyl 2-methyl-3-butenate	0.03	0.02
diethyl 2-methyl-pentanedioate	0.01	0.03
diethyl 2,3-dimethylbutanedioate	0	0
diethyl hexanoate	0.02	0.023

Beyond dtbpx, Xantphos-type ligation under base-assisted conditions has been shown to enable selective methoxycarbonylation of 1,3-butadiene to methyl 3-pentenoate, with mechanistic experiments isolating or inferring η^3 -allyl and acyl-Pd intermediates and highlighting the role of external base in accelerating alcoholysis of the acyl complex. These observations align with our linear preference and suggest that in our $\text{PPh}_3/\text{p-TsOH}$ system, slow alcoholysis and acid-promoted off-cycle pathways likely limit overall yield [12].

This interpretation fits within the broader mechanistic framework recently described for Pd-catalyzed alkoxycarbonylations. Two parallel catalytic cycles are generally proposed: a Pd-OR (“alkoxy”) pathway, which favors unsaturated linear esters, and a Pd-H (“hydride”) pathway, which can lead to saturated or branched products. When the reaction medium and ligand environment promote rapid CO insertion and alcoholysis from a less hindered acyl intermediate, the Pd-OR cycle predominates, accounting for the preference for linear products observed for conjugated dienes [11]. Our own combination of PPh_3 , p-TsOH, and ethanol therefore represents a practical baseline that reveals the intrinsic linear bias of 1,3-butadiene hydroalkoxycarbonylation, even though it underperforms compared with state-of-the-art bisphosphine/toluene protocols. Literature precedents indicate that improvements are achievable by switching to bulkier bidentate ligands such as dtbpx or Xantphos, reducing medium acidity or adding a non-nucleophilic base, and employing less coordinating, apolar solvents each of which has been shown to enhance both catalytic activity and linear selectivity [5].

Hydroalkoxycarbonylation of 1,5-hexadiene. Under identical reaction conditions, hydroethoxycarbonylation of 1,5-hexadiene gave a distribution of five detectable products. The major species were the linear esters, with ethyl 6-heptenoate (1) dominating the mixture, accompanied by a minor amount of ethyl 2-methyl-5-hexenoate (2), in addition, three branched diesters: diethyl 2-methyl-heptanedioate (3), diethyl 2,5-dimethyl-hexanedioate (4), and a trace of diethyl octanedioate (5) were observed:



Chromatographic analysis of the hydroalkoxycarbonylation of 1,5-hexadiene in the presence of $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ and $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ catalysts showed that ethyl 6-heptenoate was the major product, obtained in 8.59% and 11.06% yields, respectively. Minor products included ethyl 2-methyl-5-hexenoate (0.06% and

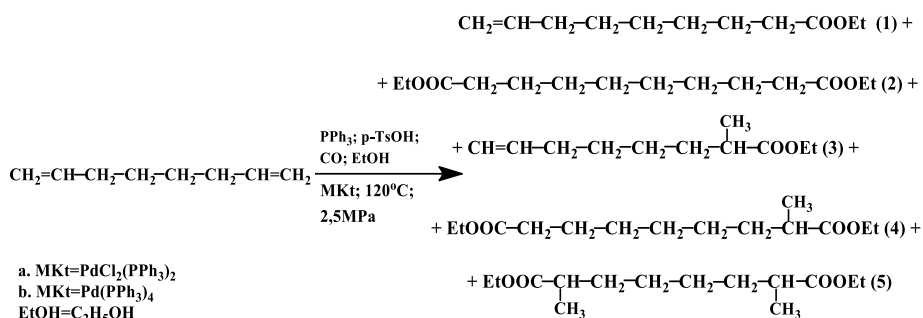
0.05%), diethyl 2-methyl-heptanedioate (0.56% and 0.84%), diethyl 2,5-dimethyl-hexanoate (0.07% and 0.09%), and diethyl octanedioate (5.9% and 5.65%). (Table 2). The superiority of the non-conjugated diene is consistent with the reduced electronic stabilization of η^3 -allyl off-cycle species and more accessible terminal hydropalladation relative to 1,3-butadiene.

Earlier studies on 1,5-dienes show another layer of selectivity: under Pd catalysis these substrates can isomerize and then undergo hydrocarbonylative cyclization, giving five-membered ring products instead of simple linear esters. Whether this pathway dominates depends strongly on the ligand, the amount of acid, and the CO pressure. Milder acidity and ligands that make intramolecular trapping less favorable help keep the reaction on the acyclic, linear path, while stronger acids or conditions that favor a more cationic Pd species tend to promote cyclocarbonylation. In our experiments we mainly observed linear esters with only a small amount of diester, which is consistent with conditions that do not strongly promote the ring-forming route. Reviews of non-conjugated alkene and diene carbonylations report similar trends, noting that a higher linear-to-branched ratio is usually achieved when the phosphine ligands are bulkier and when the system contains chloride or has a lower acid load, factors that steer the key hydropalladation step toward terminal insertion and match well with the selectivity we observed [13,14].

Table 2 – Product yield of the reaction of hydroalkoxycarbonylation of hexadiene-1,5

Product	with PdCl ₂ (PPh ₃) ₂ cat. product yield, %	with Pd(PPh ₃) ₄ cat. product yield, %
ethyl 6-heptenoate	8.59	11.06
ethyl 2-methyl-5-hexenoate	0.06	0.05
diethyl 2-methyl-heptanedioate	0.56	0.84
diethyl 2,5-dimethyl-hexanoate	0.07	0.09
diethyl octandioate	5.9	5.65

Hydroalkoxycarbonylation of octadiene-1,7. The longest-chain substrate, 1,7-octadiene, underwent hydroethoxycarbonylation to yield a broader but still regioselective product spectrum. The reaction primarily furnished ethyl 8-nonenoate (1), with smaller amounts of ethyl 2-methyl-7-octenoate (2). Three branched dicarboxylates: diethyl 2-methyl-nonanedioate (3), diethyl 2,7-dimethyl-octanedioate (4), and a fraction of diethyl decanedioate (5) were also detected:



From the chromatograms obtained, it was observed that the hydroalkoxycarbonylation of 1,7-octadiene manifested even higher regioselectivity and yield for the linear ester, ethyl 8-nonenoate: 22.5% with PdCl_2 and an outstanding 32.08% with $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$. Minor peaks in the chromatograms corresponded to ethyl 2-methyl-7-octenoate (7.47% and 10.07%), diethyl 2-methyl-nonanedioate (0.88% and 1.97%), diethyl 2,7-dimethyl-octanedioate (0.5% and 0.71%), and diethyl decanoate (9.48% and 8.79%) (Table 3). The larger C8 backbone minimizes internal steric congestion during linear acyl formation and facilitates alcoholysis, rationalizing the observed boost in both conversion and linear selectivity. The superior performance of $\text{Pd}(0)/\text{PPh}_3$ relative to $\text{Pd}(\text{II})/\text{PPh}_3$ is in line with multiple studies where electron-rich, robust $\text{Pd}(0)$ sources stabilize the acyl-Pd resting state and resist aggregation/deactivation, thereby enhancing turnover frequency. Complementary literature on diene dimethoxycarbonylation and on the assisting role of anions further supports that subtle medium and counter-ion effects modulate acyl stability and product distribution - factors that could be leveraged to further increase the mono-hydroalkoxycarbonylation channel toward linear esters [15].

Table 3 – Product yield of the reaction of hydroalkoxycarbonylation of octadiene-1,7

Product	with $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ cat. product yield, %	with $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ cat. product yield, %
ethyl 8-nonenoate	22.5	32.08
ethyl 2-methyl-7-octenoate	7.47	10.07
diethyl 2-methyl nonanedioate	0.88	1.97
diethyl 2,7-dimethyl octanedioate	0.5	0.71
diethyl decanoate	9.48	8.79

4. Conclusion

This study shows that palladium-phosphine catalysts promote the hydroalkoxycarbonylation of both conjugated and non-conjugated dienes with ethanol and CO, giving a clear preference for linear esters over branched products. Among the substrates, 1,3-butadiene was the least reactive, whereas 1,5-

hexadiene and especially 1,7-octadiene underwent conversion more readily and with stronger selectivity for the linear isomer. The $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ catalyst consistently outperformed $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$, underscoring the value of an electron-rich $\text{Pd}(0)$ center for stabilizing acyl intermediates and sustaining turnover. Taken together with prior reports, the data highlight three main elements that govern selectivity in these reactions: the nature of the diene (conjugated and non-conjugated), the steric and electronic properties of the ligand, and medium effects such as acidity and solvent polarity. Adjusting these factors allows higher yields and tighter control of product distribution, offering a practical route to $\text{C}_5\text{-C}_{10}$ esters useful in materials, fragrance, and fine-chemical applications.

Funding: This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26100971 “Development of a technology for the production of fragrance compounds based on carboxylic acid esters via the utilization of unsaturated hydrocarbons from oil refinery gases using metal-complex carbonylation”).

Conflict of Interest: All authors declare that they have no conflict of interest.

РЕГИОСЕЛЕКТИВНОЕ ГИДРОАЛКОКСИКАРБОНИЛИРОВАНИЕ 1,3-БУТАДИЕНА, 1,5-ГЕКСАДИЕНА И 1,7-ОКТАДИЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПАЛЛАДИЯ-ФОСФИНА

А.М. Әзімбай^{1}, Н.Ж. Құдайбергенов^{1,2}, К.М. Шалмағамбетов¹,
А.Е. Аликеев¹, З. Бақытжан¹, М.Х. Зықай¹*

¹Центр Физико-Химических Методов Исследования и Анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный Женский Педагогический Университет, кафедра Химии, Алматы, Казахстан

Резюме: Гидроалкоксикарбонилирование диенов представляет собой простой и атомарно-экономичный способ получения ценных сложных эфиров, полученных из простого ненасыщенного сырья и монооксида углерода. В этой работе мы исследовали региоселективное гидроалкоксикарбонилирование трех типичных субстратов: 1,3-бутадиена, 1,5-гексадиена и 1,7-октадиена с использованием палладий-фосфиновых катализаторов в этаноле при 120°C и давлении 2.5 МПа. Два катализатора, $[\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2]$ и $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4]$, были протестированы в комбинации с дополнительным PPh_3 и *p*-толуолсульфоновой кислотой. Для всех трех диеновых соединений реакции неизменно благоприятствовали образованию линейного сложного эфира, причем выходы увеличивались по мере увеличения длины диеновой цепи и уменьшения конъюгации: с 2.31% для этил-4-пентеноата (из 1,3-бутадиена) до 32.08% для этил-8-ноненоата (из 1,7-октадиена). Превосходные характеристики $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ по сравнению с $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ подчеркивают важность обогащенных электронами соединений $\text{Pd}(0)$ для стабилизации ацильных промежуточных продуктов и поддержания каталитического цикла. Эти результаты не только проясняют, как структура катализатора и особенности субстрата влияют на реакционную способность при гидроалкоксикарбонилировании диена, но и дают практическое руководство по подбору условий для повышения линейной селективности. Такие выводы расширяют синтетический потенциал этой методики для получения сложных эфиров $\text{C}_5\text{-C}_{10}$, востребованных при производстве полимеров, пластификаторов, ароматических веществ и тонкой органической химии.

Ключевые слова: алкадиены, гидроалкоксикарбонилирование, палладиевые катализаторы, этиловые эфиры, региоселективность

Әзімбай Абзал Мейрмбекұлы	<i>Магистр технических наук</i>
Құдайбергенов Нұрболат Жарылқасынұлы	<i>Доцент</i>
Шалмагамбетов Каиржан Мустафинович	<i>Доктор химических наук, заведующий лабораторией</i>
Аликеева Алуа Ержановна	<i>Докторант</i>
Бақытжан Заррина	<i>Докторант</i>
Зықай Меруерт Халыққызы	<i>Старший научный сотрудник</i>

ПАЛЛАДИЙ-ФОСФИННІҢ КАТАЛИТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, 1.3-БУТАДИЕНДІ, 1.5-ГЕКСАДИЕНДІ ЖӘНЕ 1.7-ОКТАДИЕНДІ РЕГИОСЕЛЕКТИВТІ ГИДРОАЛКОКСИКАРБОНИЛДЕУ

**А.М. Әзімбай^{1*}, Н.Ж. Құдайбергенов^{1,2}, К.М. Шалмагамбетов¹,
А.Е. Аликеева¹, З. Бақытжан¹, М. Х. Зықай¹**

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Физика-Химиялық Зерттеу және Талдау Әдістері Орталығы, Алматы, Қазақстан

²Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті, Химия кафедрасы, Алматы, Қазақстан

Түйіндемe: Диендердің гидроалкоксихарбонилденуі қарапайым қанықпаған шикізаттар мен көміртек оксидінен бағалы эфирлерді алудың тікелей және атом-экономикалық тәсілін ұсынады. Бұл жұмыста 1.3-бутадиен, 1.5-гексадиен және 1.7-октадиен сияқты үш үлгілік қосылыстың этанолда 120°C температурада және 2.5 МПа СО қысымында палладий-фосфинді катализаторлар қатысында региоселективті гидроалкоксихарбонилденуі зерттелді. Катализаторлар ретінде $[PdCl_2(PPh_3)_2]$ және $[Pd(PPh_3)_4]$ қосымша PPh_3 және *p*-толуолсульфон қышқылымен бірге қолданылды. Барлық диендер үшін реакциялар негізінен сызықты эфирлердің түзілуімен жүрді, ал шығымдар тізбектің ұзындығына қарай артып, қос байланыстың конъюгациясы азайған сайын жоғарылады: 1.3-бутадиеннен алынған этил-4-пентеноат үшін 2.31%-дан бастап, 1.7-октадиеннен алынған этил-8-ноненат үшін 32.08%-ға дейін жетті. $PdCl_2(PPh_3)_2$ -мен салыстырғанда $Pd(PPh_3)_4$ жүйесінің жоғары белсенділігі $Pd(0)$ -дің электронға бай түрлерінің ацил аралық қосылыстарды тұрақтандырудағы және каталитикалық циклді қолдаудағы маңызын көрсетті. Бұл нәтижелер катализатор құрылымының және субстрат ерекшеліктерінің диендердің гидроалкоксихарбонилдену реакциясына әсерін түсіндіреді және жоғары селективтілікке қол жеткізуге мүмкіндік беретін практикалық жағдайларды анықтайды. Мұндай қорытындылар C_5 - C_{10} эфирлерін синтездеудің тиімді жолдарын ашып, оларды полимерлер, пластификаторлар, хош иісті заттар және жұқа органикалық синтезде қолдануға жол ашады.

Түйінді сөздер: алкадиендер, гидрооксихарбонилдеу, палладий катализаторлары, этил эфирлері, региоселективтілік

Әзімбай Абзал Мейрмбекұлы	<i>Техника ғылымдарының магистрі</i>
Құдайбергенов Нұрболат Жарылқасынұлы	<i>Доцент</i>
Шалмагамбетов Каиржан Мустафинович	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
Аликеева Алуа Ержановна	<i>Докторант</i>
Бақытжан Заррина	<i>Докторант</i>
Зықай Меруерт Халыққызы	<i>Аға ғылыми қызметкер</i>

References

1. Sang R., Kucmierczyk P., Dong K., Franke R., Neumann H., Jackstell R., Beller M. Palladium-catalyzed selective generation of CO from formic acid for carbonylation of alkenes. *American Chemical Society*, **2018**. Vol. 140, Is. 15. P. 5217–5223. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b01123>
2. Fang X., Li H., Jackstell R., Beller M. Palladium-catalyzed alkoxy carbonylation of conjugated dienes under acid-free conditions: Atom-economic synthesis of β,γ -unsaturated esters. *Angewandte Chemie - International Edition*, **2014**. Vol. 53, Is. 34. P. 9030–9034. DOI: 10.1002/anie.201404563
3. Keglevich G., Kégl T., Odinet I.L., Vinogradova N.M., Kollár L. Carbonylation reactions catalysed by rhodium(III) and palladium(II) complexes containing novel phosphine ligands. *Comptes Rendus Chimie*, **2004**. Vol. 7, Is. 8–9. P. 779–784. DOI:10.1016/j.crci.2004.02.013
4. Beller M., Krotz A., Baumann W. Palladium-Catalyzed Methoxycarbonylation of 1,3-butadiene: Catalysis and Mechanistic Studies. *Advanced Synthesis & Catalysis*, **2002**. Vol. 344, Is. 5. P. 517. [https://doi.org/10.1002/1615-4169\(200207\)344:5<517::AID-ADSC517>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1615-4169(200207)344:5<517::AID-ADSC517>3.0.CO;2-Q)
5. Yang J., Liu J., Ge Y., Huang W., Ferretti F., Neumann H., Jiao H., Franke R., Jackstell R., Beller M. Efficient Palladium-Catalyzed Carbonylation of 1,3-Dienes: Selective Synthesis of Adipates and Other Aliphatic Diesters. *Angewandte Chemie International Edition. John Wiley and Sons Inc*, **2021**. Vol. 60, Is. 17. P. 9527–9533. DOI:10.1002/anie.202015329
6. Ameskal M., Magna L., Asensio J.M., Raybaud P. Unravelling the mechanism for the mono-alkoxy carbonylation of butadiene: what is the role of the base? *Journal of Catalysis. Academic Press*, **2025**. Vol. 450. P. 116235. DOI: 10.1016/J.JCAT.2025.116235
7. Shaughnessy K.H., Waymouth R.M. Regioselective Cyclocarboxylation of Nonconjugated Dienes to Cyclic Keto Esters. *Organometallics*, **1997**, 16, 1001-1007. <https://tesble.com/10.1021/om9607513>
8. Zhu B.C., Jiang X.Z. Palladium-catalyzed selective alkoxy carbonylation of N-vinylphthalimide. *Applied Organometallic Chemistry*, **2006**. Vol. 20, Is. 4. P. 277–282. DOI: 10.1002/aoc.1046
9. Zhaksylykova G., Shalmagambetov K., Kanapiyeva F., Kudaibergenov N., Bulybayev M., Zykai M., Abyzbekova G., Balykbayeva G. The Role of Alcohols in the Hexene-1 Hydroalkoxy carbonylation Reaction with Catalysts Based on Palladium Complexes. *Catalysts. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, **2023**. Vol. 13, Is. 12. DOI: 10.3390/catal13121507
10. Zhao H., Wei H., Guo Y., Han L., Wang L., Hu Y., Xin J. Study on the stability of palladium complexes with Hemaraphos ligand and reaction kinetics in the bis-hydroalkoxy carbonylation of 1,3-butadiene. *Journal of Catalysis. Academic Press*, **2023**. Vol. 428. P. 115160. DOI: 10.1016/J.JCAT.2023.115160
11. Mehara J., Anania M., Kočovský P., Roithová J. Competing Mechanisms in Palladium-Catalyzed Alkoxy carbonylation of Styrene. *ACS Catalysis. American Chemical Society*, **2024**. Vol. 14, Is. 8. P. 5710–5719. DOI: 10.1021/acscatal.4c00966
12. Han L.J., Rao C.S., Ma S.S., Sheng G.Y., Zhang J.P., Xu B.H. Palladium-Catalyzed Methoxycarbonylation of 1,3-butadiene to Methyl-3-Pentenoate: Introduction of a Continuous Process. *Journal of Catalysis. Academic Press*, **2021**. Vol. 404. P. 283–290. DOI: 10.1016/J.JCAT.2021.10.003
13. Zou S., Gao B., Huang Y., Zhang T., Huang H. Palladium-Catalyzed Hydrocarbonylative Cyclization of 1,5-Dienes. *Organic Letters. American Chemical Society*, **2019**. Vol. 21, Is. 16. P. 6333–6336. DOI: 10.1021/acs.orglett.9b02230
14. Sang R., Hu Y., Razaq R., Jackstell R., Franke R., Beller M. State-of-The-Art palladium-catalyzed alkoxy carbonylations. *Organic Chemistry Frontiers. Royal Society of Chemistry*, **2021**. Vol. 8, Is. 4. P. 799–811. DOI: 10.1039/d0qo01203c
15. Zhang S., Sun R., Guan P., Wang Y., Wang L., Zhu Y., Han L., Xin J. Ru-catalyzed chemoselective methoxycarbonylation of methyl pentenoate: An assistant role of chloride anions. *Chemical Engineering Journal*, **2023**. Vol. 471. P. 144642. DOI: 10.1016/J.CEJ.2023.144642

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF THERMORESPONSIVE COMPOSITE PATCHES BASED ON GELLAN GUM, CHITOSAN, AGAR, AND POLY(2-OXAZOLINE) DERIVATIVES

G.U.Begimova^{1*}, A.A. Kuldanova¹, Y.V.Nechepurenko¹,
A.A.Zhurtbayeva¹, I.A.Kurmanbayeva^{1,2}

¹Chemistry Department, S.D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan

²Chemistry Department, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: begimova.g@kaznmu.kz

Abstract: Biodegradable polymer composites were developed using gellan gum, agar-agar, and chitosan as natural matrices, with poly(2-ethyl-2-oxazoline) (PEOZ, 0.15 g) added as a functional modifier. Four film types (GG–Ch, GG–Ch–Ox, A–Ch, A–Ch–Ox) were evaluated for structural and physicochemical performance. The films showed thicknesses of 0.1648–0.3455 mm and masses of 3.70–5.68 g. Incorporation of PEOZ significantly improved folding endurance, increasing it from 68 to 90 cycles in gellan–chitosan and from 42 to 76 cycles in agar–chitosan composites. Swelling and sol–gel analyses revealed higher crosslinking density and lower soluble fraction in modified samples. FTIR spectra confirmed hydrogen bonding and electrostatic interactions, while SEM-EDS of GG–Ch–Ox demonstrated a homogeneous surface with Na⁺/Cl[−] distribution, indicating efficient ionic crosslinking. The modified systems exhibit improved mechanical stability, water retention, and morphological uniformity, making them promising candidates for biomedical uses such as wound dressings and transdermal patches.

Key words: gellan gum, chitosan, agar-agar, oxazolines, patch, polymer composites, heat-sensitive materials.

Begimova Gulzeinep Urisbayevna	PhD; E-mail: begimova.g@kaznmu.kz
Kuldanova Aishat	Master's student; E-mail: kuldanova.aishat@kaznmu.kz
Nechepurenko Yelena Victorovna	Candidate of Chemical Sciences; E-mail: nechepurenko.e@kaznmu.kz
Zhurtbayeva Aliya Adenbekovna	Candidate of Chemical Sciences; E-mail: zhurtbayeva.a@kaznmu.kz
Kurmanbayeva Indira Altayevna	Candidate of Chemical Sciences; E-mail: kurmanbayeva.i@kaznmu.kz

Citation: Begimova G.U., Kuldanova A.A., Nechepurenko Y.V., Zhurtbayeva A.A., Kurmanbayeva I.A. Synthesis and Characterization of Thermoresponsive Composite Patches Based on Gellan Gum, Chitosan, Agar, and Poly(2-Oxazoline) Derivatives. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 149-159. DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.58>

1. Introduction

In modern materials chemistry, creating polymer composites with structural stability and predictable physicochemical characteristics remains a key focus. For applications such as model investigations of diffusion and structural adaptability in polymer matrices, these materials allow tuning of mechanical strength, water-retention capacity, and permeability [1].

This study evaluated several natural polysaccharides as the basis for composite patches, including agar, gellan gum, sodium alginate, and chitosan. Although sodium alginate is biocompatible and gel-forming, it was excluded from further tests due to its low mechanical strength and high water absorption, which limit its suitability for stable polymer networks [2-3].

Gellan gum was selected as a primary structural matrix due to its excellent stability, strength, and ability to form durable gels [4,5]. When combined with other polymers, it provides a robust framework and allows fine-tuning of material properties. Chitosan was incorporated into the composites to enhance moisture retention, strengthen the network, and introduce additional intermolecular interactions [6,7]. Agar was used as a flexible, water-binding component that improves elasticity and influences molecular diffusion within the matrix [8,9].

In this work, two types of composite patches were prepared: gellan gum–chitosan and agar–chitosan, with oxazoline-based polymers incorporated into both formulations to impart thermoresponsive properties. This design allows a direct comparison of how the choice of polysaccharide affects mechanical, sorption, and structural characteristics, while the oxazoline derivatives provide temperature-dependent control over patch performance. Compared to previously reported chitosan-based polysaccharide systems, such as alginate–chitosan or carrageenan–chitosan patches, our approach offers a systematic evaluation of structural stability, water retention, and flexibility under identical preparation conditions, highlighting the novelty and relevance of these formulations.

Oxazoline-based polymers function as thermoresponsive elements, enabling temperature-dependent adjustments in mechanical stability and permeability [10].

The development of polymer composites that combine control over structural and physical properties is relevant to this field, as it provides a foundation for multipurpose materials adaptable to environmental stimuli. The goal of this research is to create and evaluate composite patches composed of agar, gellan gum, chitosan, and oxazoline derivatives, and to examine how formulation and crosslinking conditions influence their structural, sorption, and thermoresponsive properties.

2. Experimental part

Gellan gum, agar, and chitosan were employed as polysaccharide components. Agar powder of microbiological grade (Sigma-Aldrich, Cat. No. 01916, CAS 9002-18-0), gellan gum Gelrite® (Sigma-Aldrich, Cat. No. G1910, CAS 71010-52-1), and low-molecular-weight chitosan (Sigma-Aldrich, Cat. No. 448869, CAS 9012-76-4; MW 150–250 kDa; DDA 75–85%) were employed

without further purification. A further thermoresponsive ingredient, poly(2-ethyl-2-oxazoline), was added to a few chosen samples.

Composite Patches Preparation

Composites of Gellan and Chitosan (Samples GG).

A transparent solution was created by dissolving 1 g of gellan gum in 70 °C distilled water. Chitosan was made as a colloidal dispersion (0.5 g per 50 mL water) and gradually added to the gellan solution under stirring. For 30 minutes, the resulting films (patches) were exposed to ionic crosslinking in solutions of NaCl (0.1 M) and CaCl₂ (0.05 M). To get rid of any remaining salts and unreacted species, the samples were thoroughly rinsed with distilled water after crosslinking.

Composites of Agar and Chitosan (Samples A3 and A4)

To create a translucent solution, agar (1 g) was dissolved in hot distilled water. After a gentle addition of a chitosan colloid (0.5 g), glutaraldehyde (2.5 mL) was added as a crosslinker. To let the mixture gel at room temperature, it was transferred into Petri dishes. Because of the patches' adequate structural stability, no further ionic crosslinking was necessary.

Polymer Composites with 2-ethyl-2-oxazoline

Using the same methods as previously mentioned, these samples were made by adding 0.15 g of poly(2-ethyl-2-oxazoline) to the polymer mixture before glutaraldehyde was added. To get rid of any unreacted ingredients and free crosslinking agent, distilled water was used to wash each gel.

Mechanical studies of polymer patches

Measurement of Thickness. A digital caliper was used to measure the thickness of the film at three to five randomly selected locations, such as the margins and center. Each sample's mean and standard deviation were determined.

Endurance Folding. A chosen section of the film was folded repeatedly until obvious cracks or ruptures emerged in order to manually assess mechanical durability. The number of folds maintained before to failure was used to demonstrate folding endurance.

Research on Swelling. To assess how pH affects water absorption, swelling tests were carried out. For up to 72 hours, dried samples (W_0) were submerged in 250 mL of buffer solutions at room temperature. At predefined time intervals, the gels were removed, surface moisture was wiped off, and the samples were weighed (W_t). The swelling ratio was computed once equilibrium was established according to the formula (1):

$$SR = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad 1)$$

Sol–Gel Analysis. Patches were first dried at 40 °C to a constant weight (m_s) and then submerged in 100 mL of distilled water for a week, stirring occasionally, in order to identify the insoluble fraction. Samples were dried once more to a

consistent mass (m_d) following the extraction of soluble components. The following formula (2) was used to determine the gel fraction and soluble fraction:

$$\begin{aligned}\text{Gel fraction (\%)} &= (m_d/m_s) \times 100, \\ \text{Sol fraction (\%)} &= 100 - \text{Gel fraction}\end{aligned}\quad 2)$$

3. Results and discussion

Over the past two decades, polymer systems with tunable properties have become a subject of extensive research due to their ability to control the physicochemical characteristics and functional performance of materials. In particular, hybrid polysaccharide patches exhibit remarkable structural stability, flexibility, and potential applicability across various technological fields [11,12].

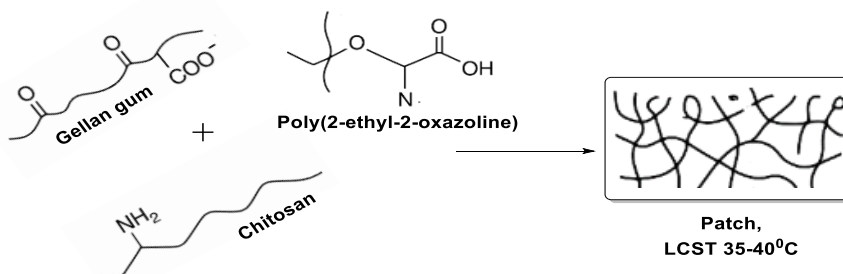


Figure 1 – Illustration of the fabrication and molecular interactions in the thermoresponsive GG-Ch-PEtOx transdermal patch.

In this study, a series of biodegradable composite patches were fabricated from gellan gum, chitosan, and agar-agar, with or without the addition of poly(2-ethyl-2-oxazoline) (PEOZ). Reference patches based on gellan gum–chitosan (GG–Ch) and agar–chitosan (A–Ch) were prepared alongside formulations containing PEOZ (GG–Ch–Ox and A–Ch–Ox) to impart thermoresponsive behavior. Gellan gum was ionically crosslinked by Na^+ and Ca^{2+} ions, providing a mechanically stable network, whereas agar–chitosan films were covalently stabilized with glutaraldehyde, allowing a direct comparison of ionic versus covalent network formation.

The concentration of PEOZ (0.05 g) was selected based on preliminary trials to balance thermoresponsive functionality with mechanical integrity. Its amphiphilic structure and ability to form hydrogen bonds with polysaccharide chains were expected to enhance elasticity, internal cohesion, and overall patch stability. Varying the PEOZ content could modulate the thermoresponsive response, mechanical strength, and swelling behavior, with higher amounts potentially increasing temperature sensitivity but reducing structural robustness, and lower amounts favoring stability but limiting responsiveness.

The incorporation of PEOZ significantly enhances the internal cohesion, elasticity, and overall stability of the composite patches through well-established

intermolecular interactions with the polysaccharide matrix. The amide groups in PEOZ form hydrogen bonds with hydroxyl groups of gellan gum and agar, as well as with amino or hydroxyl groups of chitosan. Such interactions have been demonstrated in previous studies, including hydrogen-bonded complexes of PEOZ with poly(acrylic acid) [13] and in chitosan/PEOZ films, where hydrogen bonding directly contributes to improved network integrity, mechanical performance, and controlled swelling [14]. These hydrogen-bonding interactions increase local network density, thereby supporting mechanical robustness while maintaining thermoresponsive behavior. By adjusting the PEOZ content, the elasticity, cohesion, and thermoresponsive properties of the patches can be systematically tuned, providing a reliable approach to optimize composite performance.

Morphological analysis revealed that the GG–Ch–Ox patches exhibited uniform, smooth surfaces with enhanced internal cohesion, consistent with the stabilizing effect of ionic crosslinking and PEOZ incorporation. The A–Ch–Ox patches maintained flexibility and elasticity due to agar’s gel-forming properties, while covalent crosslinking ensured structural stability. In comparison, reference GG–Ch patches were mechanically robust but less responsive to temperature changes, whereas A–Ch patches retained elasticity but exhibited slightly lower cohesion and stability.

These observations indicate that the addition of PEOZ successfully imparted thermoresponsive properties across the series of patches, while the choice of polysaccharide matrix determined the balance between mechanical strength, elasticity, and temperature-dependent behavior. Ionic crosslinking in GG-based patches conferred higher initial mechanical stability, whereas covalent crosslinking in agar-based patches preserved flexibility and smooth morphology. Overall, combining polysaccharide type, crosslinking method, and PEOZ content allows fine-tuning of composite patch properties, providing a versatile platform for future functional applications.

Table 1 – Composition of synthesized polymer patches

Simple	Gellan gum (g)	Agar-agar (g)	Chitosan (g)	glutaraldehyde (mL)	poly(2-ethyl-2-oxazoline) (g)
GG-Ch (A)	1	-	0.5		
A-Ch (C)	-	1	0.5	2.5	
GG-Ch-Ox (B)	1	-	0.5		0.05
A-Ch-Ox (D)	-	1	0.5	2.5	0.05
* Note. Gellan gum samples are crosslinked with cations Na ⁺ Agar-agar samples are crosslinked with glutaraldehyde					

The obtained compositions were homogeneous and mechanically stable, which made them suitable for further evaluation (Figure 2). The next stage of the

study included measurements of film thickness and folding endurance, tests for swelling and sol–gel ratio, and instrumental analyses SEM imaging.

Thickness, Weight Variation, and Folding Endurance of the Synthesized Patches. Table 2 summarizes the basic physical and mechanical parameters of the obtained polymer patches, including weight variation, mean thickness, and folding endurance. Two polymer systems were investigated: gellan–chitosan (GG–Ch) and agar–chitosan (A–Ch), as well as their modified forms containing a functional additive (GG–Ch–Ox and A–Ch–Ox).

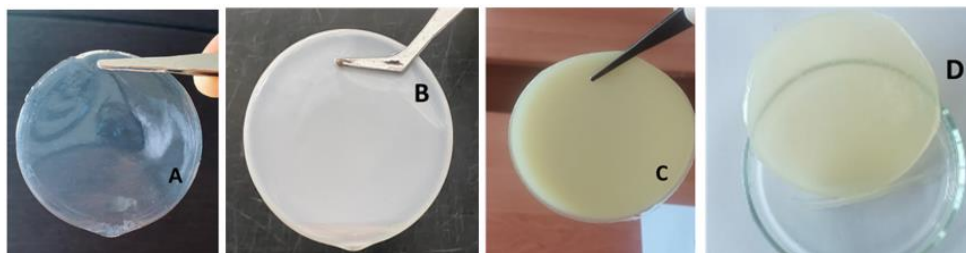


Figure 2 – Transdermal patches based on polysaccharides: A- based on gellan gum without poly-2-ethyl-2-oxazoline; B – based on gellan gum with poly-2-ethyl-2-oxazoline; C - based on agar-agar without poly-2-ethyl-2-oxazoline; D – based on agar-agar with poly-2-ethyl-2-oxazoline.

For the gellan–chitosan system, the control GG–Ch sample exhibited a mean weight of 4.34 ± 1.23 g, an average thickness of 0.1648 mm, and a folding endurance of 68 ± 0.3 cycles. Upon modification (GG–Ch–Ox), the sample mass slightly decreased to 3.70 ± 1.12 g, while the thickness increased marginally to 0.1732 mm. Notably, folding endurance improved significantly, reaching 90 ± 0.7 cycles. This enhancement suggests that the modifier contributes to better structural flexibility and cohesion, likely by reinforcing interpolymer interactions and reducing brittleness within the gellan-based matrix.

For the agar–chitosan composites, a similar tendency was observed but with a more pronounced effect. The unmodified A–Ch patch showed a higher mass (5.68 ± 1.48 g) and thickness (0.3455 mm), but relatively poor flexibility (42 ± 0.8 cycles). After modification (A–Ch–Ox), both weight and thickness decreased (4.95 ± 1.40 g and 0.3047 mm, respectively), while folding endurance nearly doubled to 76 ± 0.4 cycles. Such improvement indicates enhanced mechanical resilience and flexibility of the polymer matrix, which can be attributed to better chain mobility and uniform distribution of the functional additive throughout the agar–chitosan network.

The standard deviation values for weight variation were relatively high (SD ≈ 1.1 – 1.5 g), possibly due to manual casting and material heterogeneity, whereas deviations in folding endurance were minimal (< 1 cycle), confirming reproducibility of the mechanical behavior within each series. Overall, agar-based patches were thicker and heavier than gellan-based ones, which corresponds to

the naturally denser structure of agar networks. However, both systems exhibited a distinct improvement in mechanical endurance after modification.

These results demonstrate that the incorporation of the functional additive effectively enhances flexibility and durability under repeated deformation, particularly in agar–chitosan matrices. Further mechanical testing (e.g., tensile strength, DMA) and statistical analysis (t-test or ANOVA) would provide deeper insight into the significance and mechanism of these improvements (Table 2).

Table 2 – Results of a mechanical study of polymer patches

Formulation Code	Weight Variation (g)	Mean Thickness (mm)	Folding Endurance
GG-Ch	4.34 ± 1.23	0.1648	68 ± 0.3
GG-Ch-Ox	3.70 ± 1.12	0.1732	90 ± 0.7
A-Ch	5.68 ± 1.48	0.3455	42 ± 0.8
A-Ch-Ox	4.95 ± 1.40	0.3047	76 ± 0.4

The observed differences in weight and flexibility among the synthesized patches indicate that the introduction of the functional additive not only improves mechanical stability but also alters the internal structure and water-binding capacity of the polymer network. Since both gellan and agar matrices possess hydrophilic functional groups capable of interacting with water molecules, it was essential to investigate how the modification affects the swelling behavior of the patches. The swelling properties provide valuable information about the crosslinking density, porosity, and diffusion characteristics of the material, which are critical parameters for its potential use in controlled drug delivery and biomedical applications [15-17].

The illustration depicts the swelling kinetics of GG-Ch, A-Ch, and A-Ch-Ox samples at a pH of 4.01 (Figura 3a.). All samples demonstrate a fast mass rise within the initial 10–20 minutes, thereafter followed by a steady stabilization. The A-Ch-Ox sample has the greatest swelling capacity, due to the presence of oxazoline groups that augment hydrophilicity and water retention. The GG-Ch and A-Ch samples exhibit mild swelling attributable to denser crosslinked networks and ionic interactions within the polysaccharide matrix.

The diagram depicts the swelling characteristics of GG-Ch, A-Ch, and A-Ch-Ox samples at pH 9.18 (Figura 3b.). All samples exhibit a fast mass augmentation over the initial 10–20 minutes, subsequently followed by stabilization at equilibrium. The A-Ch-Ox sample has the greatest degree of swelling, owing to increased hydrophilicity and a more porous network structure resulting from oxazoline integration. In alkaline settings, GG-Ch has a superior swelling capacity relative to A-Ch, presumably due to the ionization of gellan functional groups and enhanced hydration of the polysaccharide matrix.

Swelling studies demonstrated that the A-Ch-Ox sample displayed the greatest hydrophilicity and water absorption in both acidic and alkaline environments, due to the presence of oxazoline moieties that enhance network

flexibility and hydrophilic connections. The GG-Ch and A-Ch samples exhibited considerable swelling attributable to denser crosslinked structures and robust ionic interactions among polysaccharide chains.

Sol–Gel analysis was conducted to determine the proportion of crosslinked (gel) and soluble (sol) fractions in the polymer samples. Dried patch films were immersed in distilled water for one week to extract the soluble components, then re-dried to constant weight. The gel fraction indicates the degree of network crosslinking, while the sol fraction corresponds to the unbound polymer chains. An increase in the gel fraction after incorporating poly(2-ethyl-2-oxazoline) demonstrated enhanced structural integrity and a higher degree of polymer crosslinking [18].

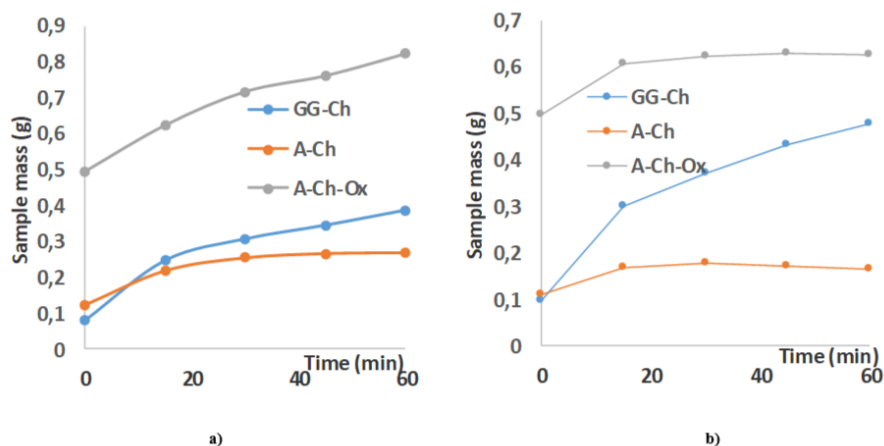


Figure 3 – Swelling behavior of GG-Ch, A-Ch, and A-Ch-Ox composite samples at different pH values: (a) 4.01 and (b) 9.18.

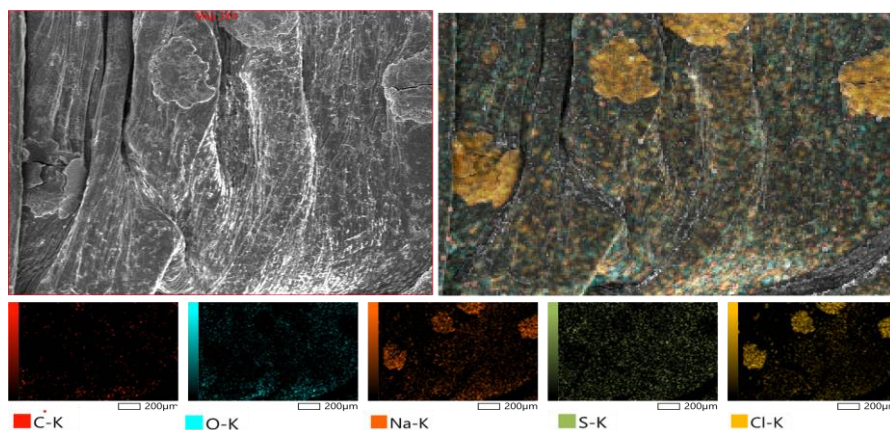


Figure 4 – SEM-EDS analysis of the GG-Ch-Ox sample shows a homogeneous surface morphology with localized Na^+ and Cl^- enrichment, indicating effective crosslinking in the presence of NaCl.

However, while spectral analysis provides indirect evidence of structural reorganization, it does not reveal the morphological characteristics of the obtained composites. Therefore, scanning electron microscopy (SEM) was employed to visualize the surface architecture and assess the distribution uniformity of the components within the polymer matrix (Figura 4).

Scanning Electron Microscopy (SEM) combined with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analysis of the GG-Ch-Ox sample, composed of gellan gum, chitosan, and oxazoline, revealed a homogeneous surface morphology with localized dense regions corresponding to sodium and chloride ion accumulation [19]. This indicates efficient crosslinking of the polymeric matrix in the presence of NaCl.

The uniform distribution of carbon (C) and oxygen (O) reflects the polysaccharide backbone, while sulfur (S) traces originate from dimethyl sulfoxide (DMSO) used during sample preparation. These findings confirm the successful formation of a composite GG-Ch-Ox polymer network with evenly distributed elements.

4. Conclusion

Biodegradable composite patches based on gellan gum, chitosan, and agar-agar were successfully obtained, and the targeted modification with poly(2-ethyl-2-oxazoline) (PEOZ) significantly improved their functional properties. PEOZ enhanced mechanical strength, folding resistance, and cohesion of the polymer network, while also providing more controlled swelling and higher structural stability, as confirmed by sol-gel analysis. SEM data supported the formation of a more uniform and integrated matrix in the modified samples. These findings indicate that PEOZ is an effective enhancer for polysaccharide-based composites and that the developed patches hold strong potential for biomedical use, including wound care and transdermal delivery.

Financing: This research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19679386 “Development of a thermoregulated transdermal patch with antibacterial and anti-inflammatory action”).

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

ГЕЛЛАН САҒЫЗЫ, ХИТОЗАН, АГАР ЖӘНЕ ПОЛИ(2-ОКСАЗОЛИН) ТУЫНДЫЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ ТЕРМОРЕСПОНСИВТІ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ ПАТЧТАРДЫ ӘЗІРЛЕУ

Г.У. Бегімова^{1}, А.А. Құлданова¹, Е.В. Неченуренко¹, А.А. Журтбаева¹, И.А. Құрманбаева^{1,2}*

¹*Химия кафедрасы, С. Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті, Алматы, Қазақстан*

²*Химия кафедрасы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан*

Түйіндемe: Биологиялық ыдырайтын полимерлі композициялар геллан сағызы, агар-агар және хитозан негізінде әзірленді. Механикалық қасиеттерін жақсарту үшін 0.15 г мөлшерінде поли(2-

этил-2-оказолин) (PEOZ) енгізілді. Төрт үлгі (GG–Ch, GG–Ch–Ox, A–Ch, A–Ch–Ox) құрылымдық және физика-химиялық параметрлері бойынша салыстырылды. Пленкалардың қалыңдығы 0.1648–0.3455 мм, массасы 3.70–5.68 г аралығында болды. PEOZ қосу қатпарлануға төзімділікті айтарлықтай арттырды: геллан-хитозанда 68-ден 90 циклге, агар-хитозанда 42-ден 76 циклге өсті. Ісіну және сол-гель талдауы модификацияланған үлгілерде айкаспалы байланыс тығыздығының жоғарылағанын көрсетті. FTIR деректері полисахаридтер арасындағы сутектік және электростатикалық байланыстарды растады. SEM-EDS (GG–Ch–Ox) біртекті бет пен Na^+/Cl^- иондарының таралуын көрсетіп, тиімді иондық айкаспалануын дәлелдеді. Жанартылған материалдар механикалық тұрақтылығы, су ұстауы және морфологиялық біркелкілігі арқасында жара таңғыштары мен трансдермальді патчтар сияқты биомедициналық қолдануларға қолайлы.

Түйінді сөздер: геллан сағызы, хитозан, агар-агар, оксазолиндер, патч, полимерлі композиттер, ыстыққа сезімтал материалдар.

<i>Бегимова Гульзейнеп Урисбаевна</i>	<i>PhD</i>
<i>Құлданова Айшат</i>	<i>магистрант</i>
<i>Нечепуренко Елена Викторовна</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Журтбаева Алия Аденбековна</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты</i>
<i>Курманбаева Индира Алтаевна</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты</i>

РАЗРАБОТКА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТЫРЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕЛЛАНОВОЙ КАМЕДИ, ХИТОЗАНА, АГАРА И ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИ(2-ОКСАЗОЛИНА)

Г.У. Бегимова^{1}, А.А. Құлданова¹, Е.В. Нечепуренко¹, А.А. Журтбаева¹, И.А. Курманбаева^{1,2}*

¹Кафедра химии, Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

²Кафедра химии, Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

Резюме: Биоразлагаемые полимерные композиции получены на основе геллановой камеди, агар-агара и хитозана, с добавлением 0.15 г поли(2-этил-2-оказолина) (PEOZ) для улучшения свойств. Четыре варианта плёнок (GG–Ch, GG–Ch–Ox, A–Ch, A–Ch–Ox) исследованы по структурным и физико-химическим характеристикам. Толщина составляла 0.1648–0.3455 мм, масса — 3.70–5.68 г. Введение PEOZ повысило устойчивость к многократному сгибанию: в системе геллан–хитозан с 68 до 90 циклов, в агар–хитозане — с 42 до 76 циклов. Анализы набухания и сол–гель показали увеличение плотности сшивки и снижение растворимой фракции. FTIR подтвердил наличие водородных и электростатических взаимодействий. SEM-EDS изображения GG–Ch–Ox выявили однородную поверхность и распределение Na^+/Cl^- , указывая на эффективное ионное сшивание. Модифицированные системы демонстрируют повышенную механическую прочность, удержание воды и морфологическую однородность, что делает их перспективными для медицинских применений — перевязочных материалов и трансдермальных патчей.

Ключевые слова: геллановая камедь, хитозан, агар-агар, оксазолины, патч, полимерные композиты, термочувствительные материалы.

<i>Бегимова Гульзейнеп Урисбаевна</i>	<i>PhD</i>
<i>Құлданова Айшат</i>	<i>магистрант</i>
<i>Нечепуренко Елена Викторовна</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Журтбаева Алия Аденбековна</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Курманбаева Индира Алтаевна</i>	<i>кандидат химических наук</i>

References

1. Bharadwaj, S.; Garg, V.K.; Sharma, P.K.; Bansal, M.; Kumar, N. Recent Advancement in Transdermal Drug Delivery System. *Int. J. Pharma Prof. Res.* **2011**, *2*, 24–35.
2. Dev, M.J.; Warke, R.G.; Warke, G.M.; Mahajan, G.B.; Patil, T.A.; Singhal, R.S. Advances in Fermentative Production, Purification, Characterization, and Applications of Gellan Gum. *Bioresour. Technol.* **2022**, *359*, 127498. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127498>.
3. Lalebeigi, F.; Alimohamadi, A.; Afarin, S.; Aghamirza Moghim Aliabadi, H.; Mahdavi, M.; Farahbakhshpour, F.; Hashemiaval, N.; Kalantari Khandani, K.; Eivazzadeh-Keihan, R.; Maleki, A. Recent Advances on Biomedical Applications of Gellan Gum: A Review. *Carbohydr. Polym.* **2024**, *334*, 122008. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122008>.
4. Shukla, R.; Kashaw, S.K.; Jain, A.P.; Lodhi, S. Fabrication of Apigenin Loaded Gellan Gum–Chitosan Patches (GGCH-HGs) for Effective Diabetic Wound Healing. *Int. J. Biol. Macromol.* **2016**, *91*, 1110–1119. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.075>.
5. Reczyńska-Kolman, K.; Hartman, K.; Kwiecień, K.; Brzychczy-Włoch, M.; Pamuła, E. Composites Based on Gellan Gum, Alginate and Nisin-Enriched Lipid Nanoparticles for the Treatment of Infected Wounds. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *23*, 321. <https://doi.org/10.3390/ijms23010321>.
6. Zia, K.M.; Tabasum, S.; Khan, M.F.; Akram, N.; Akhter, N.; Noreen, A.; Zuber, M. Recent Trends on Gellan Gum Blends with Natural and Synthetic Polymers: A Review. *Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, *109*, 1068–1087. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.099>.
7. Gering, C.; Rasheed, A.; Koivisto, J.T.; Párraga, J.; Tuukkanen, S.; Kellomäki, M. Chemical Modification Strategies for Viscosity-Dependent Processing of Gellan Gum. *Carbohydr. Polym.* **2021**, *269*, 118335. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118335>.
8. Xu, Z.; Li, Z.; Jiang, S.; Bratlje, K.M. Chemically Modified Gellan Gum Patches with Tunable Properties for Use as Tissue Engineering Scaffolds. *ACS Omega* **2018**, *3*, 6998–7007. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00683>.
9. Krauland, A.H.; Leitner, V.M.; Bernkop—Schnürch, A. Improvement in the in Situ Gelling Properties of Deacetylated Gellan Gum by the Immobilization of Thiol Groups. *J. Pharm. Sci.* **2003**, *92*, 1234–1241. <https://doi.org/10.1002/jps.10371>.
10. Pańczyszyn, E.; Jaśko, M.; Miłek, O.; Niedziela, M.; Męcik-Kronenberg, T.; Hoang-Bujnowicz, A.; Zięba, M.; Adamus, G.; Kowalczyk, M.; Osyczka, A.M.; et al. Gellan Gum Patches Cross-Linked with Carbodiimide Stimulates Vacuolation of Human Tooth-Derived Stem Cells in Vitro. *Toxicol. In Vitro* **2021**, *73*, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2021.105111>.
11. Jeong, W.Y.; Kwon, M.; Choi, H.E.; Kim, K.S. Recent Advances in Transdermal Drug Delivery Systems: A Review. *Biomater. Res.* **2021**, *25*, 24. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00226-6>.
12. Begimova, G.; Kuldanova, A.; Smailova, K.; Kurmanbayeva, I. Development of a Biodegradable Patch Based on Polysaccharides. *Polymers* **2025**, *17*(21), 2908. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/21/2908>.
13. Chao Su, Jiaxing Sun, Xuejian Zhang, Duan ShenDuan Shen, Shuguang Yang Hydrogen-Bonded Polymer Complex Thin Film of Poly(2-oxazoline) and Poly(acrylic acid) // *Polymers* **2017**, *9*(8), 363. <https://doi.org/10.3390/polym9080363>.
14. Abilova, G.K.; Kaldybekov, D.B.; Irmukhametova, G.S.; Kazybayeva, D.S.; Iskakbayeva, Z.A.; Kudaibergenov, S.E.; Khutoryanskiy, V.V. Chitosan/Poly(2-ethyl-2-oxazoline) Films with Ciprofloxacin for Application in Vaginal Drug Delivery. *Materials* **2020**, *13*, 1709. <https://doi.org/10.3390/ma13071709>.
15. El-Gendy, N.; Abdelbary, G.; EL-Komy, M.; Saafan, A. Design and Evaluation of a Bioadhesive Patch for Topical Delivery of Gentamicin Sulphate. *Curr. Drug Deliv.* **2009**, *6*, 50–57. <https://doi.org/10.2174/156720109787048276>.
16. Takeuchi, Y.; Ikeda, N.; Tahara, K.; Takeuchi, H. Mechanical Characteristics of Orally Disintegrating Films: Comparison of Folding Endurance and Tensile Properties. *Int. J. Pharm.* **2020**, *589*, 119876. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119876>.
17. Alven, S.; Peter, S.; Aderibigbe, B.A. Polymer-Based Patches Enriched with Essential Oils: A Promising Approach for the Treatment of Infected Wounds. *Polymers* **2022**, *14*, 3772. <https://doi.org/10.3390/polym14183772>.
18. Che, X.; Zhao, T.; Hu, J.; Yang, K.; Ma, N.; Li, A.; Sun, Q.; Ding, C.; Ding, Q. Application of Chitosan-Based Patch in Promoting Wound Healing: A Review. *Polymers* **2024**, *16*, 344. <https://doi.org/10.3390/polym16030344>.
19. Abdollahi, H.; Amiri, S.; Amiri, F.; Moradi, S.; Zarrintaj, P. Antibacterial Biocomposite Based on Chitosan/Pluronic/Agarose Noncovalent Patch: Controlled Drug Delivery by Alginate/Tetracycline Beads System. *J. Funct. Biomater.* **2024**, *15*, 286. <https://doi.org/10.3390/jfb15100286>.

МАЗМҰНЫ

<i>К.А. Кадирбеков, М.Т. Ошакбаев, Н.А. Бузаев, Н.Н. Оралбаев, Г.Г. Сейтхал, С. Кенегес, Н.А. Шадин, А.Ж. Абюров, Р. Қайынбаева, А.А. Еспенбетов, М.Н. Баимбетов</i>	
ФЕРРОҚОРЫТПА ӨНДІРІСІНІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ПРОПАНТТАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАЙДАЛАҢУ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ.....	5
<i>Н.Э. Наджафзаде</i>	
ӨЗІРБАЙЖАНДЫҚ САЗ МИНЕРАЛДЫ-ТІО ₂ КОМПОЗИТТИ ФОТОАНОДТАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ЖОҒАРЫ ТИІМДІ БОЯҒЫШТАРМЕН СЕЗІМТАЛДАНҒАН КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІНЕ АРНАЛҒАН РУТЕНИЙСІЗ ОРГАНОЭЛЕМЕНТТИ БОЯҒЫШТАРДЫ ӨЗІРЛЕУ	21
<i>А.Б. Қалдыбаева, В.К. Ю, А.А. Сергазы, Т.М. Сейлханов, Ф. Дурап, М. Айдемир, Н.С.Мухамадиев</i>	
МЕТОКСИФЕНЭТИЛ ЖӘНЕ ИМИДАЗОЛПРОПИЛ ФАРМАКОФОРЛЫ N-БЕНЗИЛБИСПИДИН: β-CD ЖАҢА ТУЫНДЫ КЕШЕНДЕРІНІҢ МИЕЛОЫНТАЛАНДЫРУШЫ ЖӘНЕ ӨСУДІ ЫНТАЛАНДЫРАТЫН БЕЛСЕНДІЛІГІН БАҒАЛАУ	30
<i>Б.Г.Алимхан, С.А.Канжар, А.С. Тапалова, А.Б. Тойбазарова, А.Т. Шурагазиева, Н.А. Ахатаев, Б.Б.Абжалелов, Н.О. Аппазов</i>	
КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН МАЙ БӨЛІП АЛУ ЖӘНЕ МАЙ ҚЫШҚЫЛДАРЫНЫҢ МОНОГЛИЦЕРИДТЕРІН АЛУ	41
<i>П.Ш. Мамедова, Э.Р. Бабаев, К.Р. Кахраманова, Ф.Г. Мұштагова</i>	
ГЕРБИЦИДТЕРМЕН ЛАСТАҒАН ТОПЫРАҚТАРДЫҢ БИОРЕМЕДАЦИЯСЫ	52
<i>А.Б. Узакова, А. Ерланұлы, Э.М. Ергалиева, К.А. Кадирбеков</i>	
ТУБЕРКУЛЁЗ ЖӘНЕ ҚАНТ ДИАБЕТІ БАР НАУҚАСТАРДА ДӘРІЛІК ФОРМАЛАРДЫҢ КЛИНИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІ: САЛЫСТЫРМАЛЫ ШОЛУ	62
<i>А.Байшибеков, Т.Жұмаділов, Д.Фишер, Ю.Хапонюк, С.Темирова, С.Юлусов, Б. Алтайбаев, Д.Карім</i>	
РЕНИЙ ИОНДАРЫН ТАҢДАМАЛЫ СОРБЦИЯ ЖӘНЕ ДЕСОРЦИЯЛАҒАНДАҒЫ ПОЛИ (4-ВИНИЛПИРИДИН):ПОЛИ (МЕТАКРИЛ ҚЫШҚЫЛЫ) ИНТЕРПОЛИМЕРЛІ ЖҮЙЕСІ	78
<i>А.К. Байдуллаева, Р.Н. Тулеева, М.Муссалимова, А.Таубатырова, Г. Төлеутай, Н.А. Бектенов</i>	
ОРАМАЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРҒА АРНАЛҒАН БИОНЕГІЗДІ ВИТРИМЕРЛЕР: ТҰРАҚТЫ ДИНАМИКАЛЫҚ ПОЛИМЕРЛІК ТОРЛАРДЫ ҚҰРУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ	87
<i>М. Төлегенқызы, Р.А.Нарманова, А. Серікқұл, Г.С.Даирбекова, Н.А.Ахатаев, К.Х.Дармагамбет, Б.А.Абжалелов, Е.А.Назаров, Н.О.Аппазов</i>	
КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН НАТРИЙ АЛЮМОСИЛИКАТЫН АЛУ ӘДІСІН ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ	107
<i>К.А. Садыков С.Б. Рыспаева, А.Ж. Керимкулова, Ш.С. Ислам, К. Маратқызы, Е. Арыслан</i>	
АСФАЛЬТЕННІҢ ТҰНУЫН ЖАҢА ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕР АРҚЫЛЫ ТҰРАҚТАНДЫРУ	117
<i>Д. Мұхамедия, Д.Н. Махаева, Д.Абдулети, Г.К.Абилова, Д.Б. Калдыбеков, Г.С.Ирмухаметова</i>	
4-ХЛОРБЕНЗАЛЬДЕГИДПЕН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ХИТОЗАНДЫ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОДАН АЛЫНҒАН ГИДРОГЕЛЬДЕРДІҢ АНТИМИКРОБТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ	128
<i>А.М. Әзімбай, Н.Ж. Құдайбергенов, К.М. Шалмагамбетов, А.Е. Аликеева, З. Бақытжан, М.Х. Зықай</i>	
ПАЛЛАДИЙ-ФОСФИННІҢ КАТАЛИТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, 1,3-БУТАДИЕНДІ, 1,5-ГЕКСАДИЕНДІ ЖӘНЕ 1,7-ОКТАДИЕНДІ РЕГИОСЕЛЕКТИВТИ ГИДРОАЛКОКСИКАРБОНИЛДЕУ	138
<i>Г.У. Бегімова, А.А. Құлданова, Е.В. Нечепуренко, А.А. Жұртбаева, И.А. Құрманбаева</i>	
ГЕЛЛИАН САҒЫЗЫ, ХИТОЗАН, АГАР ЖӘНЕ ПОЛИ(2-ОКСАЗОЛИН) ТУЫНДЫЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ ТЕРМОРЕСПОНСИВТИ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ ПАТЧТАРДЫ ӨЗІРЛЕУ.....	149

СОДЕРЖАНИЕ

<i>К.А. Кадирбеков, М.Т. Ошакбаев, Н.А. Бузаев, Н.Н. Оралбаев, Г.Г. Сейтхал, С.Кенегес, Н.А. Шадин, А.Ж. Абюров, Р.Кайынбаева, А.А. Еспенбетов, М.Н.Баимбетов</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПРОПАНТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОЦЕНКА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	5
<i>Н.Э. Наджафзаде</i> РАЗРАБОТКА БЕЗРУТЕНИЕВЫХ ОРГАНОЭЛЕМЕНТНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ КРАСИТЕЛЕМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ФОТОАНОДОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ АЗЕРБАЙДЖАНА И TiO_2	21
<i>А.Б. Қалдыбаева, В.К. Ю, А.А. Сергазы, Т.М. Сейлханов, Ф. Дурап, М. Айдемир, Н.С. Мухамадиев</i> N-БЕНЗИЛБИСПИДИН С МЕТОКСИФЕНЭТИЛОВЫМИ И ИМИДАЗОЛПРОПИЛОВЫМИ ФАРМАКОФОРАМИ: ОЦЕНКА МИЕЛОСТИМУЛИРУЮЩЕЙ И РОСТСТИМУЛИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ НОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ β -CD	30
<i>Б.Г. Алимхан, С.А. Канжар, А.С.Тапалова, А.Б.Тойбазарова, А.Т. Шурагазиева, Н.А.Ахатаев, Б.Б.Абжалелов, Н.О. Аппазов</i> ВЫДЕЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ПОЛУЧЕНИЕ МОНОГЛИЦЕРИДОВ ЖИРНЫХ КИСЛОТ НА ЕГО ОСНОВЕ	41
<i>П.Ш. Мамедова, Э.Р. Бабаев, К.Р. Кахраманова, Ф.Г. Муштагова</i> БИОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГЕРБИЦИДАМИ	52
<i>А.Б. Узакова, А. Ерланұлы, Э.М. Ергалиева, К.А. Кадирбеков</i> КЛИНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ У БОЛЬНЫХ ТУБЕРКУЛЕЗОМ И САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР	62
<i>А.Байишибеков, Т. Джумадилов, Д.Фишер, Ю.Хапонюк, С.Темирова, С.Юлусов, Б. Алтайбаев, Д. Карим</i> ИНТЕРПОЛИМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛИ(МЕТАКРИЛОВАЯ КИСЛОТА): ПОЛИ (4-ВИНИЛПИРИДИН) ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ИОНОВ РЕНИЯ	78
<i>А.К. Байдуллаева, Р.Н.Тулеева, М.Муссалимова, А.Таубатырова, Г.Толеутай, Н.А. Бектенов</i> УСТОЙЧИВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СЕТИ ДЛЯ УПАКОВКИ: РАЗРАБОТКА И ПЕРСПЕКТИВЫ БИО-ОСНОВАННЫХ ВИТРИМЕРОВ	87
<i>М.Толегенкызы, Р.А.Нарманова, А.Сериккул, Г.С.Даирбекова, Н.А.Ахатаев, К.Х.Дармагамбет, Б.А.Абжалелов, Е.А.Назаров, Н.О.Аппазов</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОСИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ	107
<i>К.А. Садыков, С.Б. Рыспаева, А.Ж. Керимкулова, Ш.С. Ислам, К. Маратқызы, Е. Арыслан</i> СТАБИЛИЗИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АСФАЛЬТЕНОВ С ПОМОЩЬЮ НОВЫХ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ	117
<i>Д. Мұхамедия, Д.Н. Махаева, Д.Абдулетип, Г.К.Абилова, Д.Б. Калдыбеков, Г.С. Ирмухаметова</i> ПОЛУЧЕНИЕ ОСНОВАНИЯ ШИФФА НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА И 4-ХЛОРБЕНЗАЛЬДЕГИДА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТИ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ	128
<i>А.М. Өзimbай, Н.Ж. Құдайбергенов, К.М. Шалмагамбетов, А.Е. Аликеева, З. Бақытжан, М.Х. Зықай</i> РЕГИОСЕЛЕКТИВНОЕ ГИДРОАЛКОКСИКАРБОНИЛИРОВАНИЕ 1,3-БУТАДИЕНА, 1,5-ГЕКСАДИЕНА И 1,7-ОКТАДИЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПАЛЛАДИЯ-ФОСФИНА	138
<i>Г.У. Бегимова, А.А. Құлданова, Е.В. Нечепуренко, А.А. Журтбаева, И.А. Курманбаева</i> РАЗРАБОТКА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТЫРЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕЛЛАНОВОЙ КАМЕДИ, ХИТОЗАНА, АГАРА И ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИ(2-ОКСАЗОЛИНА)	149

CONTENTS

K.A. Kadirbekov, M.T. Oshakbayev, N.A. Buzayev, N.N. Oralbayev, G.G. Seitkhal, S. Keneges, N.A. Shadin, A.Zh. Aburov, R. Kaiynbayeva, A.A. Yespenbetov, M.N. Baimbetov PRODUCTION OF PROPPANTS BASED ON FERROALLOY PRODUCTION WASTE AND ASSESSMENT OF THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS	5
Nurlan Najafzade DEVELOPMENT OF RUTHENIUM-FREE ORGANOELEMENTAL DYES FOR HIGH-EFFICIENCY DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS UTILIZING AZERBAIJANI CLAY MINERAL-TiO ₂ COMPOSITE PHOTOANODES	21
A.B. Kaldybayeva, V.K. Yu, A.A. Sergazy, T.M. Seilkhanov, F. Durap, M. Aydemir, N.S. Mukhamadiyev N-BENZYLBIPIRIDINE WITH METHOXYPHENETHYL AND IMIDAZOLEPROPYL PHARMACOPHORES: ASSESSMENT OF MYELOSTIMULATING AND GROWTH-STIMULATING ACTIVITY OF NOVEL DERIVATIVES β-CD COMPLEXES	30
B.G. Alimkhan, S.A. Kanzhar, A.S. Tapalova, A.B. Toibazarova, A.T. Shuragazyeva, N.A. Akhatayev, B.B. Abzhalelov, N.O. Appazov ISOLATION OF RICE HUSK OIL AND PREPARATION OF FATTY ACID MONOGLYCERIDES	41
P.Sh. Mammadova, E.R. Babayev, K.R. Qahramanova, F.Q. Mushtagova BIOREMEDIATION OF HERBICIDE-CONTAMINATED SOILS	52
A.B. Uzakova, A. Yerlanuly, E.M. Ergalieva, K.A. Kadirbekov CLINICAL EFFICACY OF DOSAGE FORMS IN PATIENTS WITH TUBERCULOSIS AND DIABETES: A COMPARATIVE REVIEW	62
A. Baishibekov, T. Jumadilov, D. Fischer, J. Haponiuk, S. Temirova, S. Yulusov, B. Altaibayev, D. Karim INTERPOLYMER SYSTEMS OF POLY(METHACRYLIC ACID): POLY (4-VINYLPYRIDINE) FOR THE SELECTIVE SORPTION AND DESORPTION OF RHENIUM IONS	78
A.K. Baidullayeva, R.N. Tuleyeva, M. Mussalimova, A. Taubatyrova, G. Toleutay, N.A. Bektenov SUSTAINABLE DYNAMIC POLYMER NETWORKS FOR PACKAGING: DEVELOPMENT AND PROSPECTS OF BIO-BASED VITRIMERS	87
M. Tolegenkyzy, R.A. Narmanova, A. Serikkul, G.S. Dairbekova, N.A. Akhatayev, K.Kh. Darmagambet, B.A. Abzhalelov, E.A. Nazarov, N.O. Appazov DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING SODIUM ALUMINOSILICATE FROM RICE HUSK AND INVESTIGATION OF ITS SORPTION PROPERTIES	107
K.A. Sadykov, S.B. Ryspaeva, A.Zh. Kerimkulova, Sh.S. Islam, K. Maratkyzy, E. Ayslan STABILIZATION OF ASPHALTENE DEPOSITION USING NEW DEEP EUTECTIC SOLVENTS	117
D. Mukhamediya, D.N. Makhayeva, D. Abduletip, G.K. Abilova, D.B. Kaldybekov, G.S. Irmukhametova DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN AND 4-CHLOROBENZALDEHYDE-BASED SCHIFF BASES AND ASSESSMENT OF THE ANTIMICROBIAL PERFORMANCE OF DERIVED HYDROGELS	128
A.M. Azimbay, N.Zh. Kudaibergenov, K.M. Shalmagambetov, A.E. Alikeyeva, Z. Bakytzhan, M. Kh. Zycai REGIOSELECTIVE HYDROALKOXYCARBONYLATION OF 1,3-BUTADIENE, 1,5-HEXADIENE, AND 1,7-OCTADIENE USING PALLADIUM-PHOSPHINE CATALYTIC SYSTEMS	138
G.U. Begimova, A.A. Kuldanova, Y.V. Nechepurenko, A.A. Zhurtbayeva, I.A. Kurmanbayeva SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF THERMORESPONSIVE COMPOSITE PATCHES BASED ON GELLAN GUM, CHITOSAN, AGAR, AND POLY (2-OXAZOLINE) DERIVATIVES	149

Правила оформления статей в журнале
«ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Химический журнал Казахстана» (ISSN 1813-1107, eISSN 2710-1185) выпускается ордена Трудового Красного Знамени АО «Институтом химических наук им. А.Б. Бектурова» 4 раза в год и публикует работы по широкому кругу фундаментальных, прикладных и инновационных исследований в области химии и химической технологии.

Языки публикации: казахский, русский, английский. Журнал индексируется Казахстанской библиометрической системой и включен в Перечень изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности.

Издание имеет следующие рубрики:

1. Обзорные статьи до 20 печатных страниц
2. Оригинальные статьи (до 8–10 печатных страниц)
3. Краткие сообщения (до 4–5 печатных страниц)

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СТАТЕЙ

Редакция принимает статьи от казахстанских и зарубежных авторов. В целях популяризации Журнала, редакционной коллегией приветствуется прием статей на английском языке.

Для регистрации и публикации статьи материал статьи представляется в редакцию через систему электронной подачи статьи на сайте Журнала (<https://www.chemjournal.kz/>) в комплекте со следующими документами:

1. Электронная версия статьи в форматах Word и PDF со встроенными в текст таблицами, схемами, рисунками (файл должен быть назван по фамилии первого автора на английском языке).

2. Сопроводительное письмо, адресованное в Редакцию Химического журнала Казахстана от организации, в которой данное исследование выполнено, с утверждением, что материал рукописи нигде не публиковался, не находится на рассмотрении для опубликования в других журналах и в материалах статьи отсутствуют секретные данные. В сопроводительном письме указываются сведения об авторе для корреспонденции: Фамилия, имя и отчество автора, служебный адрес с указанием почтового индекса, адрес электронной почты, телефон и ORCID.

3. Все статьи, опубликованные в Химическом журнале Казахстана (ISSN 1813-1107, eISSN 2710-1185) публикуются в открытом доступе. Чтобы обеспечить свободный доступ читателям и покрыть расходы на экспертную оценку, редактирование, поддержание сайта журнала, долгосрочное архивирование и ведение журнала, взимается плата за обработку статьи. Правила оплаты за опубликование принятой к печати статьи находятся в отдельном документе на сайте Журнала «Оплата за опубликование».

4. Статье присваивается регистрационный номер, который сообщается авторам в течение недели после получения указанного перечня документов; на этот номер необходимо ссылаться при переписке.

5. Принятым к печати статьям присваивается цифровой идентификатор (DigitalObjectIdentifier – DOI).

6. Учитывая невозможность проводить статьи на казахском языке через систему антиплагиат, будут учитываться формулировки рецензентов и решение издательской коллегии.

7. Статьи должны быть оформлены согласно шаблону, который можно скачать в разделе «Отправка материалов» на сайте Химического Журнала Казахстана.

3. СТРУКТУРА ПУБЛИКАЦИЙ

3.1. В начале **обзоров, оригинальных статей и кратких сообщений** на первой строке указывается номер по Универсальной десятичной классификации (УДК или UDC), соответствующий заявленной теме. Дается прописными буквами в верхнем левом углу. Также на первой строке справа прописными буквами полужирным шрифтом № 14 указывается название журнала **ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА (ҚАЗАҚСТАННЫҢ ХИМИЯ ЖУРНАЛЫ, CHEMICAL JOURNAL OF KAZAKHSTAN)**, год, номер.

3.2. Далее через строку приводится международный стандартный сериальный номер журнала (ISSN 1813-1107, eISSN 2710-1185) и на следующей строке слева приводится DOI: который будет иметь значение после принятия статьи к печати.

3.3. Далее, после отступа строки указывается **заглавие статьи** прописными буквами, шрифт № 14 – полужирный, выравнивание текста по центру. Название должно максимально полно и точно описывать содержание статьи, включать ключевые слова, отражающие направление и/или основной результат исследования, но в то же время быть коротким и ясным и не содержать сокращений.

3.4. Далее, после отступа строки, указываются **инициалы и фамилии автора(-ов)** строчными буквами, шрифт № 12 полужирный, курсив, выравнивание текста по центру. Фамилия автора, с которым следует вести переписку, должна быть отмечена звездочкой (*): *С.С. Сатаева*, А.М. Джубаналиева.*

3.5. Через строку шрифтом № 12, строчными буквами, курсивом с выравниванием текста по центру следуют **наименование(я) организации(й)** с указанием части названия организации, которая относится к понятию юридического лица (в английском тексте необходимо указывать официально принятый перевод названия), город, страна. В английском варианте адресные сведения должны быть представлены на английском языке, в т.ч. город и страна.

Строки с фамилиями авторов и названиями организаций содержат надстрочные индексы (после фамилии и перед названием организации), указывающие на место работы авторов.

На следующей строке курсивным начертанием, шрифт № 12, с выравниванием текста по центру указывается электронный адрес для переписки.

3.6. **Резюме (Abstract, Түйіндеме)** состоит из краткого текста (не менее 150–250 слов, шрифт № 12) на языке статьи. **Abstract** публикуется в международных базах, данных в отрыве от основного текста. Резюме должно быть автономным, все вводимые обозначения и сокращения необходимо расшифровать здесь же.

Приветствуется структурированное резюме, повторяющее структуру статьи и включающее: *введение, цели и задачи, методы, результаты и обсуждение, заключение (выводы)*. В то же время, цели и задачи описываются, если они не ясны из заглавия статьи, методы следует описывать, если они отличаются новизной. В резюме включаются новые результаты, имеющие долгосрочное значение, важные

открытия, опровергающие существующие теории, а также данные, имеющие практическое значение. Следует использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины.

Резюме дается без абзачного отступа строчными буквами; оно не должно содержать номера соединений, экспериментальные данные и ссылки на литературу.

Резюме только одно – в начале текста.

3.7. Далее на языке статьи без абзачного отступа строчными буквами шрифтом № 12, выравнивание текста по левому краю приводятся **ключевые слова** (от 5 до 10 шт.), обеспечивающие наиболее полное раскрытие содержания статьи.

3.8. В **кратких сообщениях** приводится резюме (150–200 слов), ключевые слова, но деления на разделы не требуется. Дается текст краткого сообщения на одном из трех языков с выполнением требований к УДК, названию статьи, перечню авторов, наименований организаций, в которых они работают, указанию автора для переписки. В тексте краткого сообщения приводятся конкретные **существенно новые результаты, требующие закрепления приоритета** с необходимыми экспериментальными подробностями. Затем следуют: информация о финансировании, благодарности, сведения о конфликте интересов, информация об авторах и список литературы.

3.9. Статья начинается с **введения**, в котором формулируется цель и необходимость проведения исследования, кратко освещается состояние вопроса со ссылками на наиболее значимые публикации с избеганием ссылок на устаревшие результаты. Излагаются открытия, сделанные в ходе данного исследования. Указывается структура статьи.

3.10. **Экспериментальная часть** содержит описание хода и результатов эксперимента, характеристику полученных соединений. В начале экспериментальной части приводятся названия приборов, на которых зарегистрированы физико-химические характеристики веществ и указываются условия измерения; также указываются либо источники использованных нетривиальных реагентов (например, «коммерческие препараты, название фирмы»), либо даются ссылки на методики их получения.

Каждый параграф экспериментальной части, описывающий получение конкретного соединения, должен содержать его полное наименование по номенклатуре ИЮПАК и его порядковый номер в статье. В методиках обязательно указывать количества реагентов в мольных и массовых единицах (для катализаторов – массу и мольные проценты), объемы растворителей. Методика эксперимента излагается в *прошедшем* времени.

Для известных веществ, синтезированных опубликованным ранее методом, необходимо привести ссылку на литературные данные. Для известных веществ, полученных новыми или модифицированными методами, должны быть представлены их физические и спектральные характеристики, использованные для подтверждения идентичности структуры, метод синтеза и ссылка на литературные данные.

Для всех впервые синтезированных соединений необходимо привести доказательства приписываемого им строения и данные, позволяющие судить об их индивидуальности и степени чистоты. В частности, должны быть представлены данные элементного анализа или масс-спектры высокого разрешения, ИК спектры и спектры ЯМР ^1H и ^{13}C .

Данные рентгеноструктурного анализа представляются в виде **рисунков и таблиц**. Все **новые соединения**, данные PCA которых приводятся в статье, должны быть **зарегистрированы в Кембриджской базе структурных данных** и иметь соответствующие **CCDC номера**.

Если, по мнению рецензента или редактора, новые соединения не были удовлетворительно охарактеризованы, статья не будет принята к печати.

Пример методики: 3-(2-Amino-6-methylpyridino)-3-carbonyl-3,4-dihydrocoumarin (**12**). To the alcoholic solution of 2.18 g (0.01 mol) of 3-carbethoxycoumarin, 1.08 g (0.01 mol) of 2-amino-6-methylpyridine was added with stirring. The mixture was boiled for 10 h. The solution was cooled, the precipitate was filtered. Then it was washed with cold EtOH. After the drying and recrystallization of the residue from i-PrOH yield of the product **12** was 2.05 g (63%), mp 226–228 °C, Rf 0.82 (1/2, EtOAc/hexane as eluent). Calculated, %: C 68.56; H 4.32; N 9.99 for C₁₆H₁₂N₂O₃. Found, %: C 68.41; H 4.22; N 9.83. *Spectral data*.

Внимание! В статьях, посвященных синтезу новых соединений, допускается размещение **экспериментальной части** за разделом **Результаты и обсуждение**.

3.11. В разделе **Результаты и обсуждение**, который является наиболее важным, следует обсудить и объяснить полученные в работе **результаты**, проанализировать особенности синтеза, продемонстрировать и указать возможные ограничения. Провести сравнение полученных результатов с опубликованными ранее. Все новые соединения должны быть полностью охарактеризованы соответствующими спектральными и другими физико-химическими данными. В тексте обобщаются и разъясняются только те спектральные данные, которые используются для подтверждения структуры полученных соединений. Перечисление одних и тех же данных в тексте, таблицах и на рисунках не допускается. Для новых методов синтеза желательно обсудить механизм реакции. Для обобщения данных необходимо использовать понятные рисунки и таблицы. Представленные данные должны подаваться интерпретации.

При обсуждении результатов следует придерживаться официальной терминологии IUPAC. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени.

Обсуждение не должно повторять описание результатов исследования. В тексте должны быть использованы общепринятые в научной литературе сокращения. Нестандартные сокращения должны быть расшифрованы после первого появления в тексте. Единицы измерений должны быть указаны в Международной системе СИ.

3.12. Затем рекомендуется сформулировать **закключение**, в котором указать основные достижения, представленные в статье, и основной вывод, содержащий ответ на вопрос, поставленный во вводной части статьи, а также возможность использования материала статьи в фундаментальных или прикладных исследованиях.

3.13. Приводится информация о **финансировании** исследований.

3.14. Выражается **благодарность** тем, кто помог вам в подготовке вашей работы.

3.15. В рукописи должно быть заявлено о том, имеется ли **конфликт интересов**

3.16. В **информации об авторах** указываются: ученая степень, звание, должность, e-mail, ORCID.

3.17. Стаття заканчивается **списком литературы** со ссылками на русском (или казахском) языке и ссылками на языке оригинала. Ссылки на литературные источники в тексте приводятся порядковыми арабскими цифрами в квадратных скобках по мере упоминания. Каждая ссылка должна содержать только одну литературную цитату. Список литературы должен быть представлен наиболее свежими и актуальными источниками без излишнего самоцитирования (не более 20 процентов). Для статей желателен список из не менее 10 ссылок со строками доступа в интернете.

3.18. Обязательна **информация об авторах**. В ней указываются: ученая степень, звание, должность, e-mail, ORCID, **фамилия, имя, отчество** полностью на трех языках.

Информация об авторах:

Джусипбеков Умирзак Жумасилович – АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», заведующий лабораторией химии солей и удобрений, член-корреспондент Национальной академии наук Республики Казахстан, профессор; e-mail: jussipbekov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2354-9878>.

Нургалиева Гульзипа Орынтаевна – доктор химических наук, АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Республика Казахстан, e-mail: n_gulzipa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2659-3361>.

Баяхметова Замира Кенесбековна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Республика Казахстан, e-mail: zamirabkz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-2215>.

Information about authors:

Zhusipbekov Umerzak Zhumasilovich – JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Head of the Laboratory of Chemistry of Salts and Fertilizers, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor; e-mail: jussipbekov@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2354-9878>.

Nurgaliyeva Gulzipa Oryntayevna – Doctor of chemical sciences, JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: n_gulzipa@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2659-3361>.

Baiakhmetova Zamira Kenesbekovna – Candidate of chemical sciences, leading researcher, JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: zamirabkz@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-2215>.

Авторлар туралы ақпарат:

Жүсіпбеков Өмірзақ Жұмасылұлы - "Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты" АҚ, тұздар және тыңайтқыштар химиясы зертханасының меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық Ғылым академиясының корреспондент-мүшесі, профессор; e-mail: jussipbekov@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2354-9878>.

Нұрғалиева Гүлзипа Орынтайқызы - химия ғылымдарының докторы, "Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты" АҚ, Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: n_gulzipa@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2659-3361>.

Баяхметова Замира Кеңесбекқызы - химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, "Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты" АҚ,

Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: zamirabkz@mail.ru . ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-2215>.

Список цитируемой литературы оформляется в соответствии с нижеприведенными образцами библиографических описаний (4.8.).

3.19. В конце статьи после списка литературы *дополнительно* приводится перевод **Резюме** на казахский (**Түйіндеме**) и на английский языки (**Abstract**). Слово **Резюме (Abstract, Түйіндеме)** дается по центру. На следующей строке с выравниванием по левому краю прописными буквами полужирным шрифтом № 12 приводится название статьи. Через строку без абзацного отступа курсивом, полужирным шрифтом № 11 даются инициалы и фамилии авторов.

На следующей строке без абзацного отступа курсивом, строчными буквами, шрифтом № 11 приводятся места работы авторов с надстрочными индексами (после фамилии и перед названием организации), указывающие на место работы авторов. Затем через строку с абзацного отступа с выравниванием текста по ширине идет текст резюме, набранный строчным шрифтом № 12.

Далее через строку с абзацным отступом строчными буквами шрифтом № 12, с выравниванием текста по ширине приводятся **ключевые слова** (от 5 до 10 шт.), обеспечивающие наиболее полное раскрытие содержания статьи.

3.20. Для статей, подаваемых на языке, отличном от английского (на казахском или русском языке), в конце статьи находится английский блок (**Abstract, Information about authors, References**).

3.21. Все страницы рукописи следует пронумеровать.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

4.1. Объем статьи, включая аннотацию и список литературы: до 8–10 страниц. Обзорные статьи могут быть до 20 страниц. Статья должна быть напечатана на одной стороне листа А4 шрифтом Times New Roman, размер кегля 14 пт; межстрочный интервал – одинарный и полями: верхнее – 2.0 см, нижнее – 2.0 см, левое – 3.0 см, правое – 1.5 см; расстановка переносов не допускается; абзацный отступ – 1.0 см; форматирование – по ширине. Должен быть использован текстовый редактор *Microsoft Word for Windows*, в виде *doc*-файла, версия 7.0 и более поздние.

Для краткости и наглядности обсуждения соединения, упоминаемые более одного раза, следует нумеровать **арабскими** цифрами в сочетании со строчными **латинскими** буквами (для обозначения соединений с переменным заместителем). При упоминании полного названия соединения шифр дается в скобках.

Стереохимические символы и приставки, характеризующие структурные особенности или положение заместителя в молекуле, следует набирать курсивом (*italic*): (*R*)-энантиомер, *трет*-бутил, *пара*-ксилол. Вместо громоздких названий неорганических и часто употребляемых органических соединений следует давать их формулы: NaBr, TsOH вместо бромид натрия и толуолсульфоновая кислота. При использовании терминов и обозначений, не имеющих широкого применения в литературе, их значения поясняются в тексте при первом употреблении: например, полиэтилентерефталат (ПЭТФ).

Для изображения структурных формул химических соединений необходимо использовать редактор химических формул **ChemDrawUltra**. Все надписи на схемах приводятся на английском языке. В схеме необходимо указывать все условия реакций: над стрелкой – реагенты, катализаторы, растворители, под

стрелкой – температура, время, выход. Если условия реакций сильно загружают схему, их можно перенести в конец схемы, расшифровывая буквенными индексами, например, *i*: HCl, H₂O, 80 °C, 5h. Такой же буквенный индекс должен быть указан над стрелкой соответствующей реакции.

4.2. Уравнения, схемы, таблицы, рисунки и ссылки на литературу нумеруются в порядке их упоминания в тексте и *должны быть вставлены в текст статьи* после первого упоминания. Таблицы и рисунки должны сопровождаться подписью; заголовки к схемам даются при необходимости.

4.3. По возможности следует готовить **рисунки** с помощью компьютера. Однотипные кривые должны быть выполнены в одинаковом масштабе на одном рисунке. Кривые на рисунках нумеруются арабскими цифрами, которые расшифровываются в подписях к рисункам. Для всех **рисунков** необходимо представить графические файлы в формате *jpeg* с минимальным разрешением 300 dpi. Надписи на рисунках должны быть на английском языке и по возможности заменены цифрами, расшифровка которых дается в подписи к рисунку.

Одиночные прямые, как правило, не приводят, а заменяют уравнением линии регрессии. Пересечение осей координат следует располагать в левом углу рисунка, стрелки на концах осей не ставятся, линии, ограничивающие поле рисунка не приводятся, масштабная сетка не наносится. Малоинформативные рисунки, не обсуждаемые в статье спектры, вольтамперограммы и другие зависимости не публикуются. **Рисунки спектров не должны быть выполнены от руки**. Все рисунки должны иметь нумерацию арабскими цифрами (если рисунок не один). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рисунок 1 – Детали прибора.

4.4. Каждая **таблица** должна иметь тематический заголовок и порядковый арабский номер (без знака №), на который дается ссылка в тексте (таблица 1). Название таблицы располагается над таблицей слева без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире без точки после названия. Графы в таблице должны иметь краткие заголовки, отражающие параметры, численные значения которых приведены в таблице; они пишутся в именительном падеже единственного числа с прописной буквы и через запятую сопровождаются соответствующими единицами измерения (в сокращенной форме). Рисунки или структурные формулы в графах таблиц не допускаются. Пропуски в графах при отсутствии данных обозначают тремя точками, при отсутствии явления – знаком «тире». Примечания к таблицам индексируются арабскими цифрами и помещаются в границах таблицы под материалом таблицы. Слово «Примечание» следует печатать с прописной буквы с абзаца. Если примечание одно, то после слова «Примечание» ставится тире и примечание печатается с прописной буквы. Несколько примечаний нумеруют по порядку арабскими цифрами без проставления точки и печатают с абзаца. В таблицах используют тот же шрифт, что и в тексте статьи; допускается уменьшенный (не менее № 10 шрифт TimesNewRoman).

4.5. При выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться системы СИ: г, мг, м, см, мкм (микромметр, микрон); нм (наномметр, миллимикрон); пм (пикомметр); Е (ангстрем); с (секунда); мин, ч (час), Гц (герц); МГц (мегагерц); Э (эрстед); Гс (гаусс); В (вольт); эВ (электронвольт); А (ампер); Ом, Па (паскаль); МПа (мегапаскаль); ГПа (гектопаскаль); Дж (джоуль); К (кельвин), °C (градус Цельсия); Д (Дебай).

В десятичных дробях целая часть отделяется от дробной не запятой, а точкой.

Используются следующие сокращения: т.кип. и т.пл. (точки кипения и плавления) – перед цифрами; конц. (концентрированный перед формулой соединения); М – молекулярная масса); моль, кал, ккал, н. (нормальный), М. (молярный); концентрация растворов обозначается (г/см³, г/л, моль/л).

Для всех впервые синтезированных соединений обязательны данные элементного анализа либо масс-спектры высокого разрешения.

В *брутто-формулах* элементы располагаются в следующем порядке: С, Н и далее согласно латинскому алфавиту. Формулы молекулярных соединений и ониевых солей даются через точку (например, C₅H₅N.HCl). Пример записи констант и данных элементного анализа: т.кип. 78°C (100 мм рт. ст.), т.пл. 50°C (EtOH), d₄²⁰0.9809, n_D²⁰1.5256; Найдено, %: С 59.06; Н 7.05; I 21.00; N 8.01. C_aH_bI_cN_dO_e. Вычислено, %: С 59.02; Н 7.01; I 21.20; N 8.22.

ИК и УФ спектры. В экспериментальной части для ИК и УФ спектров должны быть указаны характеристические частоты полос, длины волн максимумов поглощения, коэффициенты экстинкции (или их логарифмы) и условия, при которых записан спектр.

Примеры записи: ИК спектр (тонкий слой), ν , см⁻¹: 1650 (C=N), 3200–3440 (O–H). УФ спектр (EtOH), $\lambda_{\max}$, нм (lg ϵ): 242 (4.55), 380 (4.22).

Спектры ЯМР ¹H и ¹³C. Должны быть указаны рабочая частота прибора, использованный стандарт и растворитель. Протоны в составе сложных групп, к которым относится сигнал, следует подчеркнуть снизу – 3.17–3.55 (4H, м, N(CH₂CH₃)₂); для положения заместителей использовать обозначения 3-CH₃; для обозначения положения атомов – C-3, N-4 и т.д. Если какой-нибудь сигнал в спектре описывается как дублет, триплет или дублет дублетов и т.п. (а не синглет или мультиплет), необходимо привести соответствующие КССВ. Если проведены дополнительные исследования для установления строения или пространственных взаимодействий атомов, должны быть указаны использованные двумерные методы. В описании спектров ЯМР ¹³C отнесение конкретного сигнала к конкретному атому углерода приводится только тогда, когда определение проведено на основе двумерных экспериментов.

Примеры записи:

Спектр ЯМР¹H (400 МГц, CDCl₃), δ , м. д. (J, Гц): 0.97 (3H, т, J= 7.0, CH₃); 3.91 (2H, к, J= 7.0, COOCH₂); 4.46 (2H, д, J= 6.1, NCH₂); 7.10–7.55 (6H, м, H-6,7,8, NHCH₂C₆H₅); 7.80 (1H, с, HAr); 7.97 (1H, с, H-5'); 8.13 (1H, д. д, J= 8.2, J= 2.3, H-5); 11.13 (1H, с, NH).

Спектр ЯМР¹³C (100 МГц, DMSO-d₆), δ , м. д. (J, Гц): 36.3 (CH₂CH₃); 48.5 (C-5); 62.3 (CH₂CH₃); 123.0(CAr); 125.8 (д, ²J_{CF} = 26.1, C-3',5' Ar); 128.9 (CPh); 134.4 (C-5a); 168.3 (C=O).

Масс-спектры приводятся в виде числовых значений *m/z* и относительных значений ионного тока. Необходимо указывать метод и энергию ионизации, массовые числа характеристических ионов, их интенсивность по отношению к основному иону и по возможности их генезис. В случае химической ионизации при описании прибора необходимо указать газ-реагент. В масс-спектрах высокого разрешения найденные и вычисленные значения *m/z* приводятся с четырьмя

десятичными знаками; если найденное значение m/z соответствует не молекулярному иону, брутто-формула и вычисленное значение m/z также приводится для того же иона.

Пример записи данных масс-спектра: Масс-спектр (ЭУ, 70 эВ), m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 386 $[M]^+$ (36), 368 $[M-H_2O]^+$ (100), 353 $[M-H_2O-CH_3]^+$ (23).

Масс-спектр (ХИ, 200 эВ), m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 387 $[M+H]^+$ (100), 369 $[M+H-H_2O]^+$ (23).

Пример записи данных масс-спектра высокого разрешения:

Найдено, m/z : 282.1819 $[M+Na]^+$. $C_{17}H_{25}NNaO$.

Вычислено, m/z : 282.1828.

4.6. **Данные рентгеноструктурного исследования** следует предоставлять в виде рисунка молекулы с пронумерованными атомами, например, C(1), N(3) (по возможности в представлении атомов эллипсо и дамипетловых колебаний). Полные кристаллографические данные, таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов, температурные факторы в журнале не публикуются, а депонируются в Кембриджском банке структурных данных (в статье указывается регистрационный номер депонента).

4.7. По требованиям международных баз данных Scopus, Clarivate Analytics, Springer Nature при оценке публикаций на языках, отличных от английского, библиографические списки должны даваться не только на языке оригинала, но и на латинице (романским алфавитом). Поэтому авторы статей, подаваемых на русском и казахском языке, должны предоставлять список литературы в двух вариантах: *один на языке оригинала (Список литературы)*, а другой — *в романском алфавите (References)*. Последний список входит в английский блок, который расположен в конце статьи.

Если в списке есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются в списке **References**. При цитировании русскоязычного журнала, переводимого за рубежом, в русскоязычной версии Списка литературы необходимо привести полную ссылку на русскоязычную версию, а в **References** — на международную.

Список источников в **References** должен быть написан только на романском алфавите- латинице (при этом он должен оставаться полным аналогом Списка литературы, в котором источники были представлены на оригинальном языке опубликования).

Для написания ссылок на русскоязычные источники (и источники на иных, не использующих романский алфавит, языках) следует использовать ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПЕРЕВОД и ТРАНСЛИТЕРАЦИЮ (см. Требования к переводу и транслитерации).

В **References** требуется следующая структура библиографической ссылки из русскоязычных источников: авторы (транслитерация), перевод названия статьи или книги на английский язык, название источника (транслитерация – для тех изданий, которые не имеют установленного редакцией английского названия), выходные данные в цифровом формате, указание на язык статьи в скобках (in Russian или in Kazakh). Транслитерацию можно выполнить на сайте <http://www.translit.ru>.

Условные сокращения названий русскоязычных журналов и справочников приводятся в соответствии с сокращениями, принятыми в «Реферативном журнале Химия». англоязычных и других иностранных журналов – в соответствии с сокращениями, рекомендуемыми издательством «Springer and Business Media»:

<http://chemister.ru/Chemie/journal-abbreviations.htm>. Для статей на русском и казахском языках название журнала «Химический Журнал Казахстана» следует сокращать: «Хим. Журн. Каз.» и «Қаз. Хим. Журн.» соответственно, а для статей на английском языке: «Chem. J. Kaz.». Приводятся фамилии и инициалы **всех авторов** (сокращения и *др.* и *et al* не допускаются).

В Списке литературы и в **References** все работы перечисляются **В ПОРЯДКЕ ЦИТИРОВАНИЯ**, а **НЕ** в алфавитном порядке.

DOI. Во всех случаях, когда у цитируемого материала есть цифровой идентификатор, его необходимо указывать в самом конце описания источника. Проверять наличие doi у источника следует на сайте <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Для формирования списка литературы (всех без исключения ссылок) в Журнале принят библиографический стандарт без использования разделителя «//»:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. Title of Journal, **2005**, 10, No. 2, 49–53.

Для казахско- или русскоязычного источника:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. Title of Journal, **2005**, 10, No. 2, 49–53. (In Kazakh or In Russian).

Ниже приведены образцы оформления различных видов документов, которых необходимо придерживаться авторам при оформлении романского списка **References**.

Описание статьи из журналов:

Zagurenko A.G., Korotovskikh V.A., Kolesnikov A.A., Timinov A.V., Kardymov D.V. Technical and economical optimization of hydrofracturing design. Neftyanoe khozyaistvo. Oil Industry, **2008**, No. 11, 54–57. (In Russian).

Описание статьи с DOI:

Zhang Z., Zhu D. Experimental Research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.*, **2008**, 44, No. 8, 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077.

Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html (Accessed 23.06.2013).

или

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).

или

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov (Rules for the Citing of Sources) Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (Accessed 7 February 2011).

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminatan V., Lepkoswka-White E., Pao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer-Mediated Communication*, **1999**, 5, No. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol.5/issue2/> (Accessed 24 April 2011).

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов)

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Eksperimental'noe issledovanie prochnost soedinenii «stal'- kompozit» [Experimental study of the strength of joints «steel-

composite»]. Trudy MGTU
«*Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem*» [Proc. Of the Bauman MSTU
«Mathematic Modeling of the Complex Technical Systems»], **2006**, No. 593, 125–130.

Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Svешnikov A.V. Features of the design of the field development with the use of hydraulic fracturing. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Novye resurso sberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi»* [Proc. 6th Int. Symp. «New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact»]. Moscow, **2007**, 267–272. (In Russ.)

Нежелательно оставлять одно переводное название конференции (в случае если нет переведенного на английский язык названия конференции), так как оно при попытке кем-либо найти эти материалы, идентифицируется с большим трудом.

Описание книги (монографии, сборника):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., **1993**, 221 p.

Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniia v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., **1985**. 472 p.).

Brooking A., Jones P., Cox F. *Expert systems. Principles and cases studies*. Chapman and Hall, 1984. 231 p. (Russ. ed.: Bruking A., Dzhons P., Koks F. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery*. Moscow, Radioisviaz' Publ., **1987**. 224 p.).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Grigor'ev Yu. A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. Dokt. Tekhn. Nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., **1996**. 243 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.596.5–2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv* [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., **2007**. 10 p.

или

State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., **2007**. 10 p. (In Russian).

Описание патента:

Patent RU 228590. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head], Palkin M.V., Ivanov N.M., Gusev B.B., Petrov R.H., **2006**.

4.9. Пример англоязычного блока для представления статьи, написанной на языке, отличном от английского:

Abstract

DETERMINATION OF THE HAZARD CLASS OF OIL-CONTAMINATED AND NEUTRALIZED SOIL

Zhusipbekov U.Zh.¹, Nurgaliyeva G.O.^{1*}, Baiakhmetova Z.K.¹, Aizvert L.G.²

¹JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Almaty, Kazakhstan

²Scientific and practical center of sanitary-epidemiological examination and monitoring of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan Almaty, Kazakhstan

E-mail: n_gulzipa@mail.ru

Introduction. Pollution by oil has a negative effect on chemical, physical, agrophysical, agrochemical and biological properties of soils. Sorption methods of cleaning the soil with the help of humic preparations from oil pollution are of great importance. *The purpose* of this work is to study the composition and properties of the contaminated and neutralized soil, the determination of the toxicity indexes of all components of oil waste, the calculation of the hazard class of waste according to their toxic-ecological parameters. **Methodology.** Samples of the contaminated and neutralized soil were treated with the use of humate-based energy-accumulating substances. The metal content in the contaminated soil was determined by spectrometry using an AA 240 instrument using the method of decomposing the sample with a mixture of nitric, hydrofluoric and perchloric acids until the sample was completely opened. **Results and discussion.** Fractional composition of oil products of all samples is stable: the content of complex acetylene hydrocarbons is ~ 70.0% of the total mass of oil products, the content of resins and paraffin-naphthenic group of hydrocarbons is 27.3%, the content of bitumens is 2.6%. In the neutralized soil, paraffin-naphthenic fractions, resins, bitumens and asphaltenes were mainly found; complex acetylene hydrocarbons are not present. **Conclusion.** It has been established that the contaminated soil belongs to the substances of the 3rd hazard class. Neutralized soil became less toxic and according to the total toxicity index, it was classified as hazard class 4 (low hazard). Neutralized soil can be used as construction and road materials, at the improvement of boreholes and at land reclamation.

Keywords: oil, contaminated soil, neutralized soil, humate-based energy storage substance, toxicity, radioactivity, hazard class.

References

1. Evdokimova G.A., Gershenkop A.Sh., Mozgova N.P., Myazin V.A., Fokina N.V. Soils and waste water purification from oil products using combined methods under the North conditions. *J. Environ. Sci.*, **2012**, 47, No. 12, 1733–1738, <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.689188>
2. Badrul I. Petroleum sludge, its treatment and disposal: a review. *Int. J. Chem. Sci.*, **2015**, 13, No. 4, 1584–1602. <https://www.tsijournals.com/articles/petroleum-sludge-its-treatment-and-disposal-a-review.pdf> (accessed on 2 April 2021).
3. Krzhizh L., Reznik D. Technology of cleaning the geological environment from oil pollution. *Jekologija proizvodstva*, **2007**, No. 10, 54. (in Russ.). https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n7_44.pdf (accessed on 2 April 2021).
4. Nocentini M., Pinelli D., Fava F. Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbon mixtures: the residual concentration problem. *Chemosphere*, **2000**, No. 41, 1115–1123, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00057-6)

5. Cerqueira V.S., Peralba M.C.R., Camargo F.A.O., Bento F.M. Comparison of bioremediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **2014**, 95, 338–345, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.08.015>

54. Zemnuhova L.A., Shkorina E.D., Filippova I.A. The study of the sorption properties of rice husk and buckwheat in relation to petroleum products. *Himija rastitel'nogo syr'ja*, **2005**, No. 2, 51–(in Russ.). <http://journal.asu.ru/cw/article/view/1659> (accessed on 2 April 2021).

8. Mokrousova M.A., Glushankova I.S. Remediation of drill cuttings and oil-contaminated soils using humic preparations. *Transport. Transportnye Sooruzhenija. Jekologija*, **2015**, No. 2, 57–72. (in Russ.). <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-nauchnykh-osnov-primeneniya-guminovykh-veshchestv-dlya-likvidatsii-posledstvii> (accessed on 2 April 2021).

9. Teas Ch., Kalligeros S., Zaniokos F., Stournas S. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spill clean up. *Desalination*, **2001**, No. 140, 259–264. <http://www.desline.com/proceedings/140.shtml> (accessed on 2 April 2021).

10. Ivanov A.A., Judina N.V., Mal'ceva E. V., Matis E.Ja. Investigation of the biostimulating and detoxifying properties of humic acids of different origin under conditions of oil-contaminated soil. *Himija rastitel'nogo syr'ja*, **2007**, No. 1, 99–103. (in Russ.). <http://journal.asu.ru/cw/issue/view/6> (accessed on 2 April 2021).

11. Dzhusipbekov U.Zh., Nurgalieva G.O., Kuttumbetov M.A., Zhumasil E., Dujsenbaj D., Sulejmenova O.Ja. Pilot-industrial tests of the processing of oil-contaminated soil. *Chem. J. Kazakhstan*, **2015**, No. 3, 234–240. <http://www.chemjournal.kz/images/pdf/2019/01/2019-1-2.pdf> (accessed on 2 April 2021).

12. Patent RU 2486166. *Sposob obezvrezhivaniya neftezagrjaznennykh gruntov, sposob obezvrezhivaniya otrabotannykh burovykh shlamov* [The method of disposal of oil-contaminated soils, the method of disposal of waste drill cuttings]. Kumi V.V., **2013**. <http://www.freepatent.ru/patents/2491266> (accessed on 2 April 2021).

13. Kozlova, E.N., Stepanov, A.L. & Lysak, L.V. The influence of bacterial-humus preparations on the biological activity of soils polluted with oil products and heavy metals. *Eurasian Soil Sc.*, **2015**, 48, 400–409. <https://doi.org/10.1134/S1064229315020052>.

Ғылыми жарияланымның этикасы

«Қазақстанның химиялық журналы» (бұдан әрі – Журнал) баспасының алқасы мен бас редакторы «Жариялану этикасы жөніндегі комитет – (Committee on Publication Ethics – COPE)» (<http://publicationethics.org/about>), «Еуропалық ғылыми редакторлардың қауымдастығы» (European Association of Science Editors – EASE) (<http://www.ease.org.uk>) және Ғылыми жарияланым этикасының комитетінде (<http://publicet.org/code/>) қабылданылған халықаралық талаптарды ұстанады.

Баспа қызметіндегі әдепке сай емес іс – әрекеттерді (плагиат, жалған ақпарат және т.б.) болдырмауға және ғылыми жарияланымдардың жоғары сапасын қамтамасыз ету үшін, қол жеткізген ғылыми нәтижелерді жұртшылыққа жариялау мақсатында редакция алқасы, авторлар, рецензенттер, сондай-ақ баспа үдерісіне қатысатын мекемелер этикалық нормалар мен ережелерді сақтауға міндетті және олардың бұзылмауына барлық шараларды пайдалануы тиіс. Осы үдеріске қатысушылардың барлығының ғылыми жарияланымдар этикасының ережелерін сақтауы, авторлардың зияткерлік меншік объектілеріне құқықтарын қамтамасыз етуге, жарияланымдар сапасын арттыруға және авторлық құқықпен қорғалған материалдарды жеке тұлғалардың мүддесі үшін пайдалану мүмкіндігін жоюға көмектеседі.

Редакцияға жіберілген барлық ғылыми мақалалар міндетті түрде екі жақты құпия сараптамаға жіберіледі. Журналдың редакциялық алқасы мақаланың журнал тақырыбына және талаптарына сәйкестігін анықтайды, журналға тіркеу үшін оны алдын ала саралауға журналдың жауапты хатшысына жібереді. Ол қолжазбаның ғылыми құндылығын анықтап, мақала тақырыбына жақын ғылыми мамандықтары бар екі тәуелсіз сарапшыны анықтайды. Мақалаларды редакциялық алқа және редакциялық алқа мүшелері, сондай-ақ басқа елдерден шақырылған рецензенттер сараптайды. Мақаланы сараптау үшін рецензенттерді таңдау туралы шешімді бас редактор қабылдайды. Сараптау мерзімі 2-4 апта және рецензент өтініші бойынша оны 2 аптаға ұзартуға болады.

Редакция мен рецензент қарауға жіберілген жарияланбаған материалдардың құпиялылығына кепілдік береді. Жариялау туралы шешім журналдың редакциялық алқасы тексергеннен кейін қабылданады. Қажет болған жағдайда (редактор(лар) және/немесе рецензент(лер) тарапынан ескертулердің болуы) қолжазба авторларға қосымша түзетулерге жіберіледі, содан кейін ол қайта қаралады. Этика нормалары бұзылған жағдайда, мақаланы жариялаудан бас тарту құқығын Редакция өзіне қалдырады. Жауапты редактор мақалада плагиат деп есептеуге жеткілікті ақпарат болған жағдайда оны жариялауға рұқсат бермейді.

Авторлар редакцияға жіберілген материалдардың жаңа, бұрын жарияланбаған және түпнұсқа екендігіне кепілдік береді. Авторлар ғылыми нәтижелердің сенімділігі мен маңыздылығына, сондай-ақ ғылыми этика қағидаттарының сақталуына, атап айтқанда, ғылыми этиканы бұзылмауына (ғылыми деректерді қолдан жасау, зерттеу деректерін бұрмалауға әкелетін бұрмалау, плагиат және жалған бірлескен авторлық, қайталау, басқа адамдардың нәтижелерін иемдену және т.б.) тікелей жауапты.

Мақаланы редакцияға беру авторлардың мақаланы (түпнұсқада немесе басқа тілдерге немесе тілден аудармада) басқа журналға(ларға) жібермегенін және бұл материалдың бұрын жарияланбағанын білдіреді. Олай болмаған жағдайда мақала

авторларға «Авторлық құқықты бұзғаны үшін мақаланы жарияламау» деген шешіммен қайтарылады. Басқа автордың туындысының 10 пайыздан астамын, оның авторлығын және дереккөзге сілтемелерді көрсетпей сөзбе-сөз көшіруге жол берілмейді. Алынған үзінділер немесе мәлімдемелер автор мен дереккөзді міндетті түрде көрсете отырып ресімделуі керек. Шамадан тыс өзге материалдарды пайдалану, сондай-ақ кез келген нысандағы плагиат, соның ішінде дәйексіз дәйексөздер, басқа адамдардың зерттеулерінің нәтижелерін иемдену этикаға жатпайды және қабылданбайды. Зерттеу барысына қатынасқан барлық тұлғалардың үлесін мойындау қажет және мақалада зерттеуді жүргізуде маңызды болған жұмыстарға сілтемелер берілуі керек. Бірлескен авторлар арасында зерттеуге қатыспаған адамдарды көрсетуге жол берілмейді.

Автор(лар) жұмыстарында қателіктер байқалса, бұл туралы дереу редакторға хабарлап, түзету туралы ұсыныс беруі тиіс.

Қолжазбаны басып шығарудан бас тарту туралы шешім рецензенттердің ұсыныстарын ескере отырып, редакция алқасының отырысында қабылданады. Редакциялық алқаның шешімімен жариялауға ұсынылмаған мақала қайта қарауға қабылданбайды. Жариялаудан бас тарту туралы хабарлама авторға электрондық пошта арқылы жіберіледі.

Журналдың редакциялық алқасы мақаланы жариялауға рұқсат беру туралы шешім қабылдағаннан кейін редакциялық алқа бұл туралы авторға хабарлайды және жариялау шарттарын көрсетеді. Мақалаға берілген пікірлердің түпнұсқасы Журнал редакциясында 3 жыл сақталынады.

Этика научных публикаций

Редакционная коллегия и главный редактор научного журнала «Химический журнал Казахстана» (далее – Журнал) придерживаются принятых международных стандартов «Комитета этики по публикациям» (Committee on Publication Ethics – COPE) (<http://publicationethics.org/about>), «Европейской ассоциации научных редакторов» (European Association of Science Editors – EASE) (<http://www.ease.org.uk>) и «Комитета по этике научных публикаций» (<http://publicet.org/code/>).

Во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (плагиат, изложение недостоверных сведений и др.) и в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, признания общественностью, полученных автором научных результатов, члены редакционного совета, авторы, рецензенты, а также учреждения, участвующие в издательском процессе, обязаны соблюдать этические стандарты, нормы и правила и принимать все меры для предотвращения их нарушений. Соблюдение правил этики научных публикаций всеми участниками этого процесса способствует обеспечению прав авторов на интеллектуальную собственность, повышению качества издания и исключению возможности неправомерного использования авторских материалов в интересах отдельных лиц.

Все научные статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному двойному слепому рецензированию. Редакция Журнала устанавливает соответствие статьи профилю Журнала, требованиям к оформлению и направляет ее на первое рассмотрение ответственному секретарю Журнала, который определяет научную ценность рукописи и назначает двух независимых рецензентов – специалистов, имеющих наиболее близкие к теме статьи научные специализации. Рецензирование статей осуществляется членами редакционного совета и редакционной коллегии, а также приглашенными рецензентами других стран. Решение о выборе того или иного рецензента для проведения экспертизы статьи принимает главный редактор. Срок рецензирования составляет 2-4 недели, но по просьбе рецензента он может быть продлен, но не более чем на 2 недели.

Редакция и рецензент гарантируют сохранение конфиденциальности неопубликованных материалов присланных на рассмотрение работ. Решение о публикации принимается редакционной коллегией Журнала после рецензирования. В случае необходимости (наличие замечаний редактора(-ов) и /или рецензента(-ов)) рукопись направляется авторам на доработку, после чего она повторно рецензируется. Редакция оставляет за собой право отклонить публикацию статьи в случае нарушения правил этики. Ответственный редактор не должен допускать к публикации информацию, если имеется достаточно оснований полагать, что она является плагиатом.

Авторы гарантируют, что представленные в редакцию материалы являются новыми, ранее неопубликованными и оригинальными. Авторы несут ответственность за достоверность и значимость научных результатов, а также соблюдение принципов научной этики, в частности, недопущение фактов нарушения научной этики (фабрикация научных данных, фальсификация, ведущая к искажению исследовательских данных, плагиат и ложное соавторство, дублирование, присвоение чужих результатов и др.)

Направление статьи в редакцию означает, что авторы не передавали статью (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) в другой(-ие) журнал(ы) и что этот материал не был ранее опубликован. В противном случае статья немедленно возвращается авторам с формулировкой «Отклонить статью за нарушение авторских прав». Не допускается дословное копирование более 10 процентов работы другого автора без указания его авторства и ссылок на источник. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любой форме, включая неоформленные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы. Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статье должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании.

Если автором(-ами) обнаружена ошибка в работе, необходимо срочно уведомить редактора и вместе принять решение об исправлении.

Решение об отказе в публикации рукописи принимается на заседании редакционной коллегии с учетом рекомендаций рецензентов. Статья, не рекомендованная решением редакционной коллегии к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Сообщение об отказе в публикации направляется автору по электронной почте.

После принятия редколлегией Журнала решения о допуске статьи к публикации редакция информирует об этом автора и указывает сроки публикации. Оригиналы рецензий хранятся в редакции Журнала в течение 3 лет.

Scientific Publication Ethics

The Editorial Board and Editor-in-Chief of the scientific journal the “Chemical Journal of Kazakhstan” (hereinafter referred to as the Journal) adhere to the accepted international standards of the “Committee on Publication Ethics” (Committee on Publication Ethics – COPE) (<http://publicationethics.org/about>), the “European Association of Science Editors” (European Association of Science Editors – EASE) (<http://www.ease.org.uk>) and the “Committee on Scientific Publication Ethics” (<http://publicet.org/code/>).

To avoid unfair practices in the publishing activities (plagiarism, false information, etc.) and in order to ensure the high quality of the scientific publications and public recognition of the scientific results, obtained by the author, the members of the Editorial Board, authors, reviewers, as well as institutions, involved in the publishing process, are obliged to comply with ethical standards, rules and regulations, and take all measures to prevent their violation. The compliance with the rules of the scientific publication ethics by all process participants contributes to ensuring the rights of authors to intellectual property, improving the quality of the publication and excluding the possibility of misuse of the copyrighted materials in the interests of the individuals.

All scientific articles submitted to the editors are subject to mandatory double-blind peer reviewing. The Editorial Board of the Journal determines the compliance of the article with the specificity of the Journal, the registration requirements and sends it for the first reviewing to the Executive Secretary of the Journal, who determines the scientific value of the manuscript and appoints two independent reviewers – the specialists with the scientific specializations closest to the topic of the article. The articles are reviewed by the members of the Editorial Board and the Editorial Staff, as well as the invited reviewers from the other countries. The decision to choose one or another reviewer for reviewing the article is made by the Editor-in-Chief. The reviewing period is 2-4 weeks, though at the request of the reviewer, it can be extended, but no more than for 2 weeks.

The editors and the reviewer guarantee the confidentiality of the unpublished materials submitted for reviewing. The decision to publish is made by the Editorial Board of the Journal after reviewing. If necessary (the presence of comments by the editor(s) and/or reviewer(s)) the manuscript is sent to the authors for revision, after which it is re-reviewed. The editors reserve the right to reject from the publication of the article in case of violation of the rules of ethics. The Executive Editor should not allow the information to be published if there is sufficient reason to believe that it is plagiarism.

The authors guarantee that the materials, submitted to the editors are new, previously unpublished and original. The authors are responsible for the reliability and significance of the scientific results, as well as compliance with the principles of scientific ethics, in particular, the prevention of violations of scientific ethics (fabrication of the scientific data, falsification leading to distortion of the research data, plagiarism and false co-authorship, duplication, appropriation of other people's results, etc.).

The submission of an article to the editor means that the authors did not submit the article (in the original or translated into or from the other languages) to the other Journal(s), and that this material was not previously published. Otherwise, the article is immediately returned to the authors with the wording “Reject the article for the copyright infringement.” The word-for-word copying of more than 10 percent of the work of another author is not allowed without indicating his authorship and references to the source. The borrowed fragments or statements should be drawn-up with the obligatory

indication of the author and source. Excessive borrowing, as well as plagiarism in any form, including inaccurate quotations, paraphrasing, or appropriation of the rights to the results of the other people's research, is unethical and unacceptable. It is necessary to recognize the contribution of all persons, who in one way or another influenced the course of the research, in particular, the article should provide links to the works, which were important in the research conduction. Among the co-authors, it is unacceptable to indicate persons, who did not participate in the research.

If the author(s) finds an error in the work, it is necessary to immediately notify the editor thereof, and together decide on the correction.

The decision to refuse from the publication of the manuscript is made at a Meeting of the Editorial Board, taking into account the recommendations of the reviewers. An article, which is not recommended by the decision of the Editorial Board for the publication, is not accepted for re-consideration. A notice of the refusal to publish is sent to the author by e-mail.

After the Editorial Board of the Journal makes a decision on the admission of the article for the publication, the Editorial Board informs the author thereof, and specifies the terms of the publication. The original reviews are kept in the Editorial Office of the Journal for 3 years.

Технический редактор: *Ж.Б.Узакова*

Подписано в печать 28.11.2025г.

Формат 70x100 ¹/₁₆. 11.37. п.л. Бумага офсетная. Тираж 300.

Типография ИП «Тойходжаев Н.О.»
г.Алматы, Алмалинский район, ул. Нурмакова, 26/195 кв. 49
e-mail: iparuna@yandex.ru