

УДК 615.454.1.014:615.322:582.273-119.2:547.458

DOI <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-81>

Сергій СОКОЛОВСЬКИЙ

доктор філософії, доцент кафедри фундаментальних дисциплін, Товариство з обмеженою відповідальністю «Європейський медичний університет», вул. Академіка Георгія Дзяка, 3, м. Дніпро, Україна, 49005 (doctor.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-6559-9777

SCOPUS: 58968878800

Віталій ГЛАДИШЕВ

доктор фармацевтичних наук, професор, завідувач кафедри технології ліків, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, бульв. Марії Приймаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна, 69035 (gladishevvy@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-5935-4856

SCOPUS: 58967772700

Сергій СОКОЛОВСЬКИЙ

кандидат медичних наук, доцент, професор кафедри внутрішньої медицини, проректор з міжнародних зв'язків, Товариство з обмеженою відповідальністю «Європейський медичний університет», вул. Академіка Георгія Дзяка, 3, м. Дніпро, Україна, 49005 (doctor.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-1491-5159

SCOPUS: 58752691700

Сергій АБРАМОВ

кандидат медичних наук, доцент, ректор, Товариство з обмеженою відповідальністю «Європейський медичний університет», вул. Академіка Георгія Дзяка, 3, м. Дніпро, Україна, 49005 (texnokrat@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7088-1865

SCOPUS: 58832335000

Герман ТІТОВ

доктор медичних наук, професор, професор кафедри фундаментальних дисциплін, перший проректор, Товариство з обмеженою відповідальністю «Європейський медичний університет», вул. Академіка Георгія Дзяка, 3, м. Дніпро, Україна, 49005 (doctor.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5460-0728

SCOPUS: 58100741700

Анатолій ГОЖЕНКО

доктор медичних наук, професор, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут транспортної медицини», Міністерство охорони здоров'я України, вул. Канатна, 92, м. Одеса, Україна, 65039 (prof.gozhenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7413-4173

SCOPUS: 7003312894

Кирило ГАРНИК

кандидат медичних наук, доктор філософії, доцент, віцепрезидент Всеукраїнської громадської організації «Асоціація фахівців з народної і нетрадиційної медицини України», вул. Перемишльська, 2в, м. Київ, Україна, 04108 (kyrylo.harnyk@gmail.com)

ORCID: 0009-0003-5486-2167

SCOPUS: 59130697600

Іван КУРАЧЕНКО

полковник медичної служби, Начальник хірургічної служби, Військовий медичний центр Східного регіону, вул. Старокозацька, 63, м. Дніпро, Україна, 49600 (vanuxa87@ukr.net)

ORCID: 0009-0000-0169-2502

SCOPUS: 59557457200

Микола ХМІЛЬ

доктор філософії, науковий консультант ГО офіційного представництва в Україні Міжнародного Нобелівського інформаційного центру, вул. Мандоріковська, 222/21, м. Дніпро, Україна, 49100 (niknikolaev07@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-0557-6714

SCOPUS: 58968441100

Антон КУРІННИЙ

кандидат фармацевтичних наук, доцент кафедри технології ліків, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, бульв. Марії Приймаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна, 69035 (anton.kyrinnoy@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8403-4504

SCOPUS: 57214328913

Бібліографічний опис статті: Соколовський С., Гладішев В., Соколовський С., Абрамов С., Тітов Г., Гоженко А., Гарник К., Хміль М., Кураченко І., Курінний А. (2026). Досвід застосування карагінанів у складі гемостатичних матеріалів рослинного походження (огляд літератури). *Фітотерапія. Часопис*, 2, 81–93, doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-81>

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ КАРАГІНАНІВ У СКЛАДІ ГЕМОСТАТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Актуальність. Своєчасний та ефективний локальний гемостаз є ключовим елементом сучасної медичної допомоги та важливим чинником зниження післяопераційної летальності й ускладнень. Сучасні місцеві гемостатичні засоби представлені широким спектром матеріалів і технологій, які класифікують за механізмом дії на біологічно активні агенти, сорбційні матеріали, адгезивні герметики та комбіновані системи. Останніми роками у науковій літературі спостерігається істотне зростання інтересу до розроблення гемостатичних матеріалів на основі природних біополімерів, зокрема карагінанів, які є сульфатованими полісахаридами морського походження, характеризуються здатністю до формування гідрогелевих структур і можуть використовуватися як основа для створення сучасних біоматеріалів. Каппа-карагінан здатний утворювати стабільні тривимірні полімерні мережі, що зумовлює його перспективність у розробленні ранових покриттів і систем локального гемостазу.

Систематизація сучасних даних щодо властивостей каппа-карагінану та його застосування у складі гемостатичних матеріалів є актуальним завданням, реалізація якого дасть змогу об'єктивно оцінити його потенціал та визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Мета дослідження – аналіз сучасних наукових досліджень щодо використання каппа-карагінану як компонента місцевих гемостатичних засобів, узагальнення даних про його фізико-хімічні властивості, механізми дії, ефективність і безпеку, а також оцінка перспектив створення композиційних засобів на його основі для застосування у клінічній практиці.

Матеріал і методи. Дослідження виконано у форматі аналітичного літературного огляду сучасних наукових публікацій із використанням міжнародних наукометричних баз даних Scopus, PubMed та Web of Science. Пошук джерел літератури за ключовими словами «carrageenan», «kappa-carrageenan», «hemostatic materials», «topical hemostasis», «biopolymers», «hemostatic hydrogels» із використанням логічних операторів AND та OR для розширення вибірки релевантних публікацій.

Результати дослідження. Ретельний аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури дав змогу оцінити фізико-хімічні властивості каппа-карагінану як основи гемостатичних матеріалів. Виявлено потенційні механізми гемостатичної дії каппа-карагінану. На підставі оцінки результатів експериментальних досліджень карагінан-вмісних гемостатичних матеріалів визначено перспективність використання композитних систем і проведено порівняльну характеристику каппа-карагінану з іншими біополімерами.

Висновок. Установлено, що каппа-карагінан є перспективним біополімером морського походження, який характеризується високою здатністю до гелеутворення, біосумісністю та вираженими сорбційними властивостями. Гемостатичний ефект матеріалів на основі каппа-карагінану реалізується переважно через фізичні механізми, зокрема абсорбцію плазми крові, концентрацію формених елементів і формування гідрогелевої бар'єрної структури. Потенційна участь каппа-карагінану в активації коагуляційного каскаду пов'язана з наявністю сульфатних груп, однак цей ефект залежить від фізико-хімічних характеристик матеріалу і потребує подальшого вивчення. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що найбільш перспективним напрямом є створення композиційних систем, у яких каппа-карагінан виконує функцію структуроутворюючої матриці у поєднанні з іншими біополімерами, зокрема хітозаном та альгінатом. Дані літератури свідчать, що порівняно з традиційними гемостатичними матеріалами каппа-карагінан забезпечує формування стабільних гідрогелів без надмірної активації коагуляції, що може знижувати ризик побічних ефектів. Незважаючи на значну кількість експериментальних досліджень, кількість клінічно апробованих і комерційно доступних гемостатичних засобів на основі каппа-карагінану залишається обмеженою. Результати проведеного аналізу доводять доцільність і перспективність подальших досліджень карагінанвмісних систем, які повинні бути спрямовані на стандартизацію складу матеріалів, оцінку їх клінічної ефективності.

Ключові слова: кровотеча, кровоспинні засоби, адсорбуючі гемостатичні матеріали, гідрогелі, біополімери, каппа-карагінан.

Serhii SOKOLOVSKIY

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for International Relations, Limited liability company "European medical university", Academician Georgy Dzyaka str., 3, Dnipro, Ukraine, 49005 (doctor.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-1491-5159

SCOPUS: 58752691700

Vitalii GLADYSHEV

Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Head of the Department of Drug Technology, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Mary Pryimachenko blvd., 26, Zaporizhzhia, Ukraine, 69035 (gladishevvy@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-5935-4856

SCOPUS: 58967772700

Serhii SOKOLOVSKIY

Doctor of Philosophy, Associate Professor at the Department of Fundamental Disciplines, Limited liability company "European medical university", Academician Georgy Dzyaka str., 3, Dnipro, Ukraine, 49005 (sergiy.s.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-1491-5159

SCOPUS: 58968878800

Sergii ABRAMOV

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Rector, Limited liability company "European medical university", Academician Georgy Dzyaka str., 3, Dnipro, Ukraine, 49005 (texnokrat@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7088-1865

SCOPUS: 58832335000

German TITOV

Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor at the Department of Fundamental Disciplines with a Course of European Medical University, Acting of the First Vice-Rector, Limited liability company "European medical university", Academician Georgy Dzyaka str., 3, Dnipro, Ukraine, 49005 (doctor.sokolovskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5460-0728

SCOPUS: 58100741700

Anatoliy GOZHENKO

Doctor of Medical Sciences, Professor, State Enterprise "Ukrainian Research Institute for Transport Medicine", Ministry of Health of Ukraine, Kanatna str., 92, Odesa, Ukraine, 65039 (prof.gozhenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7413-4173

SCOPUS: 7003312894

Kyrylo HARNYK

Candidate of Medical Sciences, PhD, Associate Professor, Vice-President of the All-Ukrainian public organization "Association of Specialists in Traditional and Alternative Medicine of Ukraine", Peremyshlska str., 2v, Kyiv, Ukraine, 04108 (kyrylo.harnyk@gmail.com)

ORCID: 0009-0003-5486-2167

SCOPUS: 59130697600

Mykola KHMIL

Doctor of Philosophy, Scientific Consultant of the Official Representative Office in Ukraine of the International Nobel Information Centre, Mandrikovskya str., 222/21, Dnipro, Ukraine, 49100 (niknikolaev07@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-0557-6714

SCOPUS: 58968441100

Ivan KURACHENKO

Colonel of the Medical Service, Chief of the Surgical Service, Military Medical Center of the Eastern Region, Starokozatska str., 63, Dnipro, Ukraine, 49600 (vanuxa87@ukr.net)

ORCID: 0009-0000-0169-2502

SCOPUS: 59557457200

Anton KURINNYI

Candidate of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor at the Department of Drug Technology, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Pryimachenko blvd., 26, Zaporizhzhia, Ukraine, 69035 (anton.kyrinnoy@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8403-4504

SCOPUS: 57214328913

To cite this article: Sokolovskyi S., Gladyshev V., Sokolovskyi S., Abramov S., Titov G., Gozhenko A., Garnik K., Khmil M., Kurachenko I., Kurinnyi A. (2026). Dosvid zastosuvannia karaginaniv u skladi gemostatychnykh materialiv roslynnogo pokhodzhennia [Experience in the use of carrageenans in hemostatic materials of plant origin (literature review)]. *Fitoterapiia. Chasopys – Phytotherapy. Journal*, 2, 81–93, doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-81>

EXPERIENCE IN THE USE OF CARRAGEENANS IN HEMOSTATIC MATERIALS OF PLANT ORIGIN (LITERATURE REVIEW)

Actuality. Timely and effective local hemostasis is a key element of modern medical care and an important factor in reducing postoperative mortality and complications. Modern local hemostatic agents are represented by a wide range of materials and technologies, which are classified by the mechanism of action on biologically active agents, sorption materials, adhesive sealants and combined systems. In recent years, there has been a significant increase in interest in the development of hemostatic materials based on natural biopolymers, in particular caraginan, which are sulfated polysaccharides of marine origin, characterized by the ability to form hydrogel structures and can be used as a basis for the creation of modern biomaterials. Kappa-caraginan is able to form stable three-dimensional polymer networks, which determines its prospects in the development of wound coatings and local hemostasis systems.

Systematization of modern data on the properties of kappa-caraginan and its use in the composition of hemostatic materials is an urgent task, the implementation of which will allow to objectively assess its potential and determine promising directions for further research.

The purpose of this work is to analyze modern scientific research on the use of kappa-caraginan as a component of local hemostatic agents, summarize data on its physicochemical properties, mechanisms of action, efficiency and safety, as well as assess the prospects for creating compositional agents based on it for use in clinical practice.

Materials and methods of research. The study was carried out in the format of an analytical literary review of modern scientific publications using the international scientometric databases Scopus, PubMed and Web of Science. Search for sources of literature by keywords «carrageenan», «kappa-carrageenan», «hemostatic materials», «topical hemostasis», «biopolymers», «hemostatic hydrogels» using logical operators AND and OR to expand the selection of relevant publications.

Results of the study and their discussion. A thorough analysis of domestic and foreign literature made it possible to evaluate the physicochemical properties of kappa-caraginan as the basis of hemostatic materials. Potential mechanisms of hemostatic action of kappa-caraginan have been identified. Based on the evaluation of the results of experimental studies of karaginan-containing hemostatic materials, the prospects of using composite systems were determined and a comparative characteristic of kappa-caraginan with other biopolymers was carried out.

Conclusions. It has been established that kappa-caraginan is a promising biopolymer of marine origin, which is characterized by high gelation ability, biocompatibility and pronounced sorption properties. The hemostatic effect of kappa-caraginan materials is realized mainly through physical mechanisms, in particular the absorption of blood plasma, the concentration of shaped elements and the formation of a hydrogel barrier structure. The potential participation of kappa-caraginan in the activation of the coagulation cascade is associated with the presence of sulfate groups, but this effect depends on the physicochemical characteristics of the material and requires further study. The analysis of modern research shows that the most promising direction is the creation of composite systems in which kappa-caraginan performs the function of a structure-forming matrix in combination with other biopolymers, in particular chitosan and alginate. Literature data indicate that compared to traditional hemostatic materials, kappa-caraginan provides the formation of stable hydrogels without excessive activation of coagulation, which may reduce the risk of side effects. Despite a significant number of experimental studies, the number of clinically tested and commercially available hemostatic agents based on kappa-caraginan remains limited. The results of the analysis prove the feasibility and prospects of further studies of karaginan-containing systems, which should be aimed at standardizing the composition of materials, assessing their clinical effectiveness.

Key words: bleeding, hemostatic agents, adsorbing hemostatic materials, hydrogels, biopolymers, kappa-caraginan.

Вступ. Актуальність. Кровотеча залишається однією з провідних причин ранньої летальності при травматичних ушкодженнях, а також значущим чинником розвитку ускладнень під час хірургічних утручань. Неконтрольована крововтрата може призводити до розвитку геморагічного шоку, поліорганної недостатності та необхідності

масивних трансфузій, що суттєво підвищує ризик несприятливого клінічного перебігу. У зв'язку із цим своєчасний та ефективний локальний гемостаз є ключовим елементом сучасної медичної допомоги та важливим чинником зниження післяопераційної летальності й ускладнень (Brown and Solomon, 2024).

Сучасні місцеві гемостатичні засоби представлені широким спектром матеріалів і технологій, які класифікують за механізмом дії на біологічно активні агенти, сорбційні матеріали, адгезивні герметики та комбіновані системи. Їхня ефективність визначається здатністю швидко зупинити кровотечу шляхом активації коагуляційного каскаду, абсорбції крові або створення механічного бар'єру в зоні ушкодження. Вибір конкретного засобу залежить від типу кровотечі, локалізації ушкодження, клінічних умов та необхідності подальшого хірургічного втручання (Sánchez-Roldán et al., 2024; Hu et al., 2022).

Останніми роками у науковій літературі спостерігається суттєве зростання інтересу до розроблення гемостатичних матеріалів на основі природних біополімерів. Це пов'язано з їх високою біосумісністю, здатністю до біодеградації та можливістю регулювання фізико-хімічних властивостей залежно від умов застосування. Найбільш дослідженими представниками цієї групи є хітозан і альгінати, які широко застосовуються у складі місцевих гемостатичних систем (Xie et al., 2022; Fan et al., 2023; Gheorghiciu et al., 2023). Як показано у сучасних оглядових роботах, ефективність таких матеріалів зумовлена поєднанням декількох механізмів дії, включаючи концентрацію тромбоцитів, активацію факторів згортання та фізичне блокування кровотечі (Simpson et al., 2022; Hu et al., 2022; Fang et al., 2024).

Відповідно, зростає інтерес до сульфатованих полісахаридів морського походження, зокрема карагінанів, які характеризуються здатністю до формування гідрогелевих структур і можуть використовуватися як основа для створення сучасних біоматеріалів (Neamtu et al., 2022; Shao et al., 2024). Згідно з літературними даними, каппа-карагінан здатний утворювати стабільні тривимірні полімерні мережі, що зумовлює його перспективність у розробленні ранових покриттів і систем локального гемостазу (Liu et al., 2024).

Фізико-хімічні властивості каппа-карагінану, зокрема висока водоутримуюча здатність і здатність до набухання, відіграють важливу роль у забезпеченні гемостатичного ефекту. Показано, що карагінановмісні матеріали здатні ефективно поглинати ексудат, підтримувати оптимальне вологе середовище рани та сприяти процесам регенерації тканин (Neamtu et al., 2022; Liu et al., 2024). Водночас сучасні підходи до локального гемостазу підкреслюють, що його ефективність визначається комплексною дією фізичних і біологічних механізмів, включаючи сорбцію плазми, концентрацію формених елементів крові та утворення механічного бар'єру (Simpson et al., 2022; Hu et al., 2022; Sanyal et al., 2024).

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють гідрогелям як одній із найбільш перспективних форм гемостатичних матеріалів. Зокрема, ін'єкційні гідрогелі на основі природних полімерів демонструють здатність швидко адаптуватися до форми рани та забезпечувати ефективний гемостаз (Sanyal et al., 2024). У цьому контексті розробляються композиційні системи, які поєднують каппа-карагінан з іншими полімерними компонентами.

Зокрема, показано, що поєднання карагінану з хітозаном і неорганічними наноконцентрами дає змогу отримувати ін'єкційні гідрогелі з покращаними механічними та гемостатичними властивостями (Rao et al., 2024). Також використання карагінану у складі губчастих матеріалів сприяє підвищенню їх сорбційної здатності та ефективності зупинки кровотечі (Alizadeh et al., 2023). Інші підходи передбачають створення функціоналізованих гідрогелів із додатковими антибактеріальними властивостями, що є особливо важливим для лікування ран (Chen et al., 2025).

Окрім того, сучасні дослідження демонструють перспективність використання різних типів гідрогелів, включаючи полімерні, мінераловмісні та композитні системи, які здатні забезпечувати ефективний гемостаз у різних умовах (Huang et al., 2024; Zhang et al., 2024). Розвиток цього напрямку також пов'язаний із використанням мікросфер та пористих структур, що дають змогу покращити сорбційні властивості матеріалів (Leng et al., 2025; Sánchez del Valle et al., 2025).

Додатково, перспективним є використання природних матриксних систем, зокрема гідрогелів на основі позаклітинного матриксу, які здатні не лише забезпечувати гемостаз, а й стимулювати процеси регенерації тканин (Cai and Weng, 2023). Таким чином, сучасні дослідження демонструють перехід від простих матеріалів до складних багатокомпонентних систем із комбінованими функціональними властивостями.

Незважаючи на значний прогрес у розробленні біополімерних гемостатичних матеріалів, роль каппа-карагінану як самостійного гемостатичного агента залишається недостатньо вивченою. Здебільшого він використовується як структуроутворюючий компонент композиційних систем, тоді як основний гемостатичний ефект досягається за рахунок синергічної дії кількох компонентів (Shao et al., 2024; Fang et al., 2024).

Таким чином, систематизація сучасних даних щодо властивостей каппа-карагінану та його застосування у складі гемостатичних матеріалів є актуальним завданням, реалізація якого дасть змогу об'єктивно оцінити його потенціал та визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Мета дослідження – аналіз сучасних наукових досліджень щодо використання каппа-карагінану як компонента місцевих гемостатичних засобів, узагальнення даних про його фізико-хімічні властивості, механізми дії, ефективність і безпеку, а також оцінка перспектив створення композиційних засобів на його основі для застосування у клінічній практиці.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконано у форматі аналітичного літературного огляду сучасних наукових публікацій із використанням міжнародних наукометричних баз даних Scopus, PubMed та Web of Science. Пошук джерел літератури здійснювали за ключовими словами «carrageenan», «kappa-carrageenan», «hemostatic materials», «topical hemostasis», «biopolymers», «hemostatic hydrogels» із використанням логічних операторів AND та OR для розширення вибірки релевантних публікацій.

До аналізу включали оригінальні наукові статті, оглядові роботи та експериментальні дослідження, присвячені застосуванню біополімерів у системах локального гемостазу, а також роботи, які висвітлюють фізико-хімічні та біологічні властивості каппа-карагінану. Критеріями включення були публікації 2021–2025 рр., індексовані у міжнародних базах даних із доступними повними текстами та наявністю експериментальних або узагальнюючих даних щодо властивостей гемостатичних матеріалів.

Виключалися роботи, що не відповідали тематиці дослідження, дублікати, а також публікації без достатнього наукового обґрунтування або без доступу до повного тексту. Оцінку відібраних джерел проводили з урахуванням типу дослідження (*in vitro*, *in vivo*, огляд літератури), дизайну експерименту, характеристик досліджуваних матеріалів і релевантності отриманих результатів до проблеми локального гемостазу.

Аналіз літератури здійснювали за такими основними напрямками: фізико-хімічні властивості каппа-карагінану, механізми його потенційної гемостатичної дії, результати експериментальних досліджень карагінанвмісних матеріалів, а також сучасні підходи до створення композиційних біополімерних систем. Узагальнення отриманих даних проводили з позицій сучасних уявлень про механізми гемостазу, вимоги до місцевих гемостатичних засобів та тенденції розвитку біоматеріалів медичного призначення.

Результати дослідження та їх обговорення. *Фізико-хімічні властивості каппа-карагінану як основи гемостатичних матеріалів*

Каппа-карагінан є лінійним сульфатованим полісахаридом, який отримують із червоних водоростей класу Rhodophyceae. Його макромолекулярна струк-

тура представлена чергуванням залишків D-галактози та 3,6-ангідро-D-галактози, які формують регулярну полімерну ланку та зумовлюють характерні фізико-хімічні властивості цієї сполуки. Наявність сульфатних груп надає молекулі негативного заряду, що визначає її високу гідрофільність і здатність до іонної взаємодії з катіонами, зокрема іонами калію, кальцію та натрію. Саме ці особливості зумовлюють здатність каппа-карагінану до формування тривимірних гелевих мереж у водному середовищі (Neamtu et al., 2022; Shao et al., 2024).

Однією з ключових властивостей каппа-карагінану є його виражена здатність до гелеутворення, яка реалізується за рахунок переходу полімерних ланцюгів із випадково скрученої конфігурації у впорядковану спіральну структуру з подальшим формуванням тривимірної сітки. У водному середовищі за наявності відповідних іонів та умов температури він формує щільні гідрогелі з високою механічною стабільністю, пружністю та структурною цілісністю. Це визначає його перспективність для створення ранових покриттів, гемостатичних губок та ін'єкційних систем. Подібні властивості характерні для широкого спектра полісахаридних гідрогелів, які застосовуються у біомедичних технологіях, завдяки здатності формувати тривимірні матриці та утримувати значну кількість води (Simpson et al., 2022; Liu et al., 2024; Fang et al., 2024).

Окрім того, важливими характеристиками каппа-карагінану є висока водоутримуюча здатність і здатність до набухання. Ці властивості забезпечуються наявністю численних гідрофільних функціональних груп, які активно взаємодіють із молекулами води. У результаті полімер здатний абсорбувати значні об'єми рідини, що дає змогу ефективно поглинати рановий екссудат і концентрувати формені елементи крові в зоні ушкодження. Такий механізм є одним із ключових для сучасних гемостатичних матеріалів, оскільки сприяє локальному підвищенню концентрації тромбоцитів і факторів згортання та прискорює формування згустку (Hu et al., 2022; Szymanski et al., 2023; Leng et al., 2025). Аналогічні властивості характерні й для інших полісахаридних систем, що підтверджує важливість сорбційного компонента у механізмах гемостазу (Fang et al., 2024).

Велике значення має також реологічна поведінка карагінану, яка характеризується залежністю в'язкості та міцності гелю від концентрації полімеру, температури та іонного складу середовища. Це дає змогу регулювати властивості матеріалу шляхом варіювання технологічних параметрів і створювати системи із заданими механічними характеристи-

ками. Зокрема, підвищення концентрації іонів калію сприяє формуванню більш жорстких і стабільних гелів, тоді як інші катіони можуть змінювати структуру полімерної сітки та її пористість (Neamtu et al., 2022; Shao et al., 2024).

Згідно із сучасними дослідженнями, матеріали на основі карагінану характеризуються високою біосумісністю, низькою цитотоксичністю та відсутністю вираженої імунної відповіді, що є критично важливим для їх застосування у медичній практиці (Neamtu et al., 2022). Окрім того, вони здатні підтримувати вологе середовище рани, що сприяє міграції клітин, проліферації фібробластів і загальному прискоренню процесів загоєння. У цьому аспекті карагінан подібний до інших природних полімерів, які широко застосовуються у ранових покриттях і тканинній інженерії (Liu et al., 2024).

Важливо підкреслити, що карагінан може виступати ефективною матрицею для інкорпорації біологічно активних речовин, таких як антимікробні агенти, фактори росту або лікарські препарати. Це дає змогу створювати функціоналізовані матеріали з комбінованими властивостями, що поєднують гемостатичну, протизапальну та антимікробну дію. Подібний підхід активно розвивається у сучасних дослідженнях, де гідрогелі розглядаються як системи контрольованого вивільнення активних компонентів (Simpson et al., 2022; Sanyal et al., 2024; Chen et al., 2025).

Потенційні механізми гемостатичної дії каппа-карагінану

Гемостатичний ефект матеріалів на основі каппа-карагінану має багатофакторний характер і реалізується через поєднання фізичних, фізико-хімічних та біохімічних механізмів, що є типовим для сучасних біополімерних гемостатичних систем. На відміну від традиційних гемостатиків, дія яких часто базується на одному домінуючому механізмі, біополімерні матеріали забезпечують комплексний вплив на процеси зупинки кровотечі, поєднуючи сорбційні, бар'єрні, адгезивні та міжмолекулярні взаємодії (Simpson et al., 2022; Hu et al., 2022; Fang et al., 2024). Такий мультифункціональний підхід відповідає сучасним уявленням про локальний гемостаз як багатоступеневий процес, що включає судинну, тромбоцитарну та коагуляційну фази.

Першим і найбільш очевидним є фізико-сорбційний механізм. Завдяки високій гігроскопічності та здатності до набухання каппа-карагінан інтенсивно поглинає плазму крові, що призводить до локального підвищення концентрації тромбоцитів, еритроцитів і факторів коагуляції. У результаті створюються сприятливі умови для швидкого формування первинного

гемостатичного згустку. Відомо, що ефективність такого механізму значною мірою залежить від швидкості поглинання рідини, капілярної структури матеріалу та ступеню його набухання, що є критичними параметрами для сучасних гемостатичних систем (Szymanski et al., 2023; Hu et al., 2022; Leng et al., 2025). Подібний підхід широко використовується у порошкових, губчастих і пористих матеріалах, де основну роль відіграють концентраційний ефект і швидке зменшення об'єму вільної плазми (Fang et al., 2024).

Другим важливим механізмом є формування гелевої бар'єрної структури. Під час контакту з біологічною рідиною каппа-карагінан переходить у гідрогелевий стан, утворюючи щільну тривимірну полімерну мережу з розвинутою пористістю. Така структура забезпечує механічне перекриття дефекту тканини, зменшення крововтрати та стабілізацію вже сформованого згустку. Окрім того, гідрогелева матриця створює локальне мікросередовище, яке обмежує подальше витікання крові, сприяє утриманню формених елементів крові у зоні ушкодження та підтримує оптимальні умови для формування фібринового каркасу. Подібні властивості характерні для широкого спектра полісахаридних гідрогелів, що застосовуються як у гемостатичних матеріалах, так і у ранових покриттях (Neamtu et al., 2022; Xie et al., 2022; Liu et al., 2024). Важливою перевагою такого механізму є його відносна незалежність від функціонального стану системи згортання крові, що особливо актуально у пацієнтів із коагулопатіями або за застосування антикоагулянтів (Hu et al., 2022).

Третім можливим механізмом є взаємодія з компонентами системи згортання крові. Сульфатовані полісахариди, до яких належить каппа-карагінан, характеризуються наявністю негативно заряджених функціональних груп, що зумовлює їхню здатність до електростатичної взаємодії з білками плазми крові, включаючи фактори коагуляції, а також із клітинними компонентами (Shao et al., 2024; Fang et al., 2024). Така взаємодія може впливати на адгезію та активацію тромбоцитів, змінювати кінетику утворення фібрину та сприяти стабілізації згустку. Водночас характер і вираженість цього ефекту значною мірою залежать від молекулярної маси полімеру, ступеня сульфатування, концентрації та просторової організації матеріалу (Neamtu et al., 2022). У сучасній літературі підкреслюється, що вплив сульфатованих полісахаридів на систему коагуляції може бути як про-, так і антикоагулянтним залежно від їхніх структурних характеристик, що потребує обережної інтерпретації та додаткових експериментальних досліджень (Fang et al., 2024).

Додатково, слід урахувати можливу роль адгезивних властивостей гідрогелевих систем. Полісахаридні гідрогелі здатні забезпечувати фізичне прилипання до поверхні тканин, що посилює герметизацію рани та запобігає повторній кровотечі. У сучасних дослідженнях цей ефект часто посилюється шляхом введення функціональних груп або додаткових компонентів, що забезпечують біоадгезію (Sanyal et al., 2024).

Окремо слід відзначити, що біополімерні гідрогелі можуть сприяти адгезії клітин і формуванню фібринової мережі, що забезпечує додаткову стабілізацію гемостатичного згустку. Такий ефект описаний для різних класів біополімерів і розглядається як важливий фактор ефективності сучасних гемостатичних матеріалів (Simpson et al., 2022; Sanyal et al., 2024). Окрім того, сучасні композиційні системи можуть поєднувати гемостатичні та антибактеріальні властивості, що знижує ризик інфекційних ускладнень і покращує результати лікування ран (Chen et al., 2025).

Експериментальні дослідження карагінанвмісних гемостатичних матеріалів

Аналіз сучасної літератури показує, що більшість досліджень, присвячених використанню карагінану у гемостатичних системах, виконано у форматі *in vitro* або на експериментальних моделях тварин. Це зумовлено як складністю стандартизації таких матеріалів, так і відносно ранньою стадією їх упровадження у клінічну практику. Подібна ситуація є типовою для більшості нових біополімерних гемостатичних систем, що підтверджується сучасними оглядовими роботами (Shao et al., 2024; Fang et al., 2024).

Для матеріалів на основі карагінану показано здатність формувати стабільні гідрогелеві матриці, підтримувати вологе середовище рани, абсорбувати екссудат і проявляти добру біосумісність, що визначає їх перспективність для використання у складі ранових покриттів і багатокомпонентних біомедичних систем (Neamtu et al., 2022; Liu et al., 2024). Такі властивості є критично важливими для створення ефективних локальних гемостатичних матеріалів, оскільки забезпечують оптимальні умови для формування та стабілізації кров'яного згустку, а також сприяють процесам регенерації тканин.

Установлено, що гідрогелеві системи на основі природних полісахаридів можуть демонструвати високу ефективність у забезпеченні локального гемостазу за рахунок поєднання сорбційних властивостей, формування тривимірної структури та механічного бар'єру (Simpson et al., 2022; Hu et al., 2022;

Sanyal et al., 2024). При цьому карагінан у складі таких систем виконує переважно функцію структуруючої матриці, яка забезпечує стабільність матеріалу та контроль його фізико-хімічних характеристик, включаючи пористість, щільність і реологічні властивості.

Інші дослідження показують, що включення карагінану до складу багатокомпонентних систем дає змогу покращити їхні механічні властивості, адгезію до тканин та біологічну сумісність. Зокрема, у композиціях із альгінатами або хітозаном відзначається синергічний ефект, що проявляється у підвищенні сорбційної здатності, покращенні структурної цілісності та підвищенні ефективності гемостатичної дії (Xie et al., 2022; Fan et al., 2023; Gheorghita et al., 2023). Окремі експериментальні роботи також демонструють перспективність ін'єкційних гідрогелів на основі карагінану, модифікованих неорганічними нанокomпонентами, які забезпечують швидке формування гелю та покращені гемостатичні характеристики (Rao et al., 2024).

Окрім того, показано, що карагінанвмісні матеріали можуть використовуватися у вигляді губчастих або пористих структур із високою сорбційною здатністю, що дає змогу ефективно контролювати кровотечу навіть за її інтенсивності (Alizadeh et al., 2023; Zhang et al., 2024). Такі системи поєднують переваги гідрогелів і традиційних гемостатичних губок, забезпечуючи швидке поглинання рідини та механічну стабілізацію згустку.

Водночас слід підкреслити, що більшість експериментальних досліджень не розглядає карагінан як єдиний активний компонент, а досліджує його у складі композиційних матеріалів. Це свідчить про те, що його роль полягає переважно у формуванні полімерної матриці, стабілізації структури гідрогелю та модифікації властивостей системи, а не у прямій активації процесів згортання крові. Подібний підхід відповідає сучасним тенденціям у розробленні гемостатичних матеріалів, де акцент робиться на мультифункціональних системах (Shao et al., 2024; Fang et al., 2024).

Окремо варто зазначити, що відсутність достатньої кількості досліджень *in vivo* та клінічних випробувань обмежує можливість повної оцінки ефективності карагінану як гемостатичного агента. Більшість наявних даних має експериментальний характер і потребує подальшої валідації в умовах, наближених до клінічних. Це визначає необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих на вивчення механізмів дії, оптимізацію складу матеріалів і оцінку їх безпеки та ефективності, що узгоджується

із загальними тенденціями розвитку біополімерних гемостатиків (Sanyal et al., 2024).

Композитні системи на основі каппа-карагінану

Сучасні тенденції розвитку гемостатичних матеріалів пов'язані з переходом від монокомпонентних до багатокомпонентних систем, що дає змогу поєднувати різні механізми дії у межах одного матеріалу та підвищувати їх функціональну ефективність. У цьому контексті каппа-карагінан розглядається як один із ключових структуроутворюючих компонентів, здатний формувати тривимірні гідрогелеві матриці, регулювати реологічні властивості системи та забезпечувати її структурну стабільність. Найбільш поширеними є композиції типу карагінан – альгінат, карагінан – хітозан і карагінан – колаген (Neamtu et al., 2022; Shao et al., 2024).

Комбінування карагінану з альгінатами дає змогу отримати гідрогелеві системи з покращеною структурною стабільністю, підвищеною водоутримуючою здатністю та здатністю до швидкого гелеутворення. Альгімати, як і карагінан, належать до гідрофільних полісахаридів і забезпечують інтенсивне поглинання рідини, що сприяє концентрації формених елементів крові в зоні ушкодження. У поєднанні ці полімери формують більш стабільні та функціональні системи з оптимізованою пористістю та механічною міцністю, здатні ефективно виконувати роль локальних гемостатиків (Xie et al., 2022; Liu et al., 2024).

Композиції на основі карагінану та хітозану поєднують переваги обох полімерів. Хітозан характеризується здатністю до електростатичної взаємодії з клітинами крові, зокрема еритроцитами і тромбоцитами, що сприяє їх агрегації та прискоренню гемостазу. Водночас карагінан забезпечує формування гідрогелевої матриці, регуляцію в'язкості та стабілізацію структури матеріалу. Така синергія дає змогу створювати матеріали з підвищеною адгезією до тканин, покращеними механічними властивостями та більш вираженим гемостатичним ефектом (Fan et al., 2023; Zhang et al., 2024; Gheorghită et al., 2023). Окрім того, сучасні дослідження демонструють можливість створення ін'єкційних гідрогелів на основі цих компонентів, які здатні швидко гелувати *in situ* та ефективно заповнювати дефекти тканин (Rao et al., 2024).

Окрему увагу привертають композиції на основі карагінану та білкових компонентів, зокрема колагену. Колаген є природним компонентом позаклітинного матриксу та відіграє важливу роль у процесах гемостазу і загоєння ран, зокрема за рахунок активації тромбоцитів і участі у формуванні фібринового каркасу. Поєднання його з карагінаном

дає змогу створювати біоміметичні матеріали, які не лише забезпечують механічний гемостаз, а й сприяють регенерації тканин, клітинній проліферації та відновленню структури ушкоджених ділянок (Simpson et al., 2022; Cai and Weng, 2023).

Важливо зазначити, що сучасні композитні системи можуть включати неорганічні або нанорозмірні компоненти (наприклад, оксиди металів, глинисті мінерали), що дає змогу значно підвищити їхні функціональні властивості, зокрема механічну міцність, гемостатичну активність та антибактеріальні характеристики (Huang et al., 2024; Alizadeh et al., 2023). Такий підхід відповідає сучасним тенденціям створення мультифункціональних біоматеріалів, які поєднують гемостатичну, протимікробну та регенеративну дію.

Порівняльна характеристика каппа-карагінану з іншими біополімерами.

Порівняння каппа-карагінану з іншими біополімерами, що широко застосовуються у гемостатичних матеріалах, дає змогу визначити його місце у сучасній класифікації та оцінити перспективи практичного використання. Найбільш дослідженими та поширеними у клінічній практиці є хітозан і альгімати, які мають добре описані механізми гемостатичної дії та доведену ефективність (Simpson et al., 2022; Hu et al., 2022). Порівняльна характеристика біополімерів, що застосовуються у місцевих гемостатичних матеріалах наведена у таблиці.

Хітозан характеризується вираженою здатністю до взаємодії з клітинами крові завдяки позитивному заряду, що забезпечує швидкий гемостатичний ефект (Zhang et al., 2024). Він є катіонним полісахаридом, що зумовлює його здатність до електростатичної взаємодії з негативно зарядженими мембранами клітин крові. Це забезпечує швидку адгезію еритроцитів і тромбоцитів, їх агрегацію та активацію, що сприяє формуванню первинного гемостатичного згустку. Завдяки цьому хітозан розглядається як один із найбільш ефективних біополімерних гемостатиків із вираженою прямою дією на клітинну ланку гемостазу (Fan et al., 2023; Zhang et al., 2024; Gheorghită et al., 2023).

Альгімати, своєю чергою, належать до аніонних полісахаридів і характеризуються здатністю до іонного гелеутворення у присутності двовалентних катіонів, переважно кальцію (Sharma et al., 2024). Їх гемостатичний ефект реалізується переважно через формування гелевої структури, яка забезпечує поглинання рідини, концентрацію клітин крові та механічне перекриття рани. Альгімати широко використовуються у ранових покриттях завдяки високій

Таблиця

Порівняльна характеристика біополімерів, що застосовуються у місцевих гемостатичних матеріалах

Показник	Каппа-карагінан	Хітозан	Альгінат
Походження	Червоні водорості	Панцирі ракоподібних	Бурі водорості
Хімічна природа	Сульфатований полісахарид	Катіонний полісахарид	Аніонний полісахарид
Основний механізм гемостазу	Гелеутворення, сорбція, бар'єр	Електростатична взаємодія з клітинами крові	Гелеутворення (Ca ²⁺ -залежне)
Вплив на коагуляцію	Можлива активація внутрішнього шляху за рахунок адгезії клітин	Виражена активація за рахунок адгезії клітин	Обмежений прямий вплив
Здатність до гелеутворення	Висока	Помірна	Висока
Сорбційна здатність	Висока	Висока	Висока
Біосумісність	Висока	Висока	Висока
Антибактеріальні властивості	Помірні	Виражені	Обмежені
Основна роль у матеріалі	Матриця/структуруючий	Активний гемостатичний агент	Матриця/покриття
Типові форми	Гідрогелі, губки, порошки	Пов'язки, губки, гранули	Гелі, пов'язки
Перспективність	Висока (у композитах)	Дуже висока	Висока

біосумісності та здатності підтримувати вологе середовище (Xie et al., 2022; Sharma et al., 2024).

Каппа-карагінан також належить до аніонних полісахаридів, однак має низку відмінностей. Його ключовою перевагою є здатність до формування більш жорстких і термостабільних гідрогелів у присутності іонів калію, що забезпечує високу механічну міцність і стабільність структури. Водночас на відміну від хітозану його прямий вплив на клітинні механізми гемостазу є менш вираженим, що обмежує його використання як самостійного гемостатичного агента (Neamtu et al., 2022; Fang et al., 2024).

Істотними перевагами каппа-карагінану є його висока водоутримуюча здатність і можливість формування гідрогелевих систем із контрольованою пористістю, що дає змогу ефективно регулювати транспорт рідини та клітинних компонентів. Це робить його особливо цінним як матричний компонент у композиційних матеріалах, де він забезпечує структурну цілісність системи та оптимізує її фізико-хімічні властивості (Liu et al., 2024; Shao et al., 2024).

Окрім того, порівняльний аналіз показує, що карагінан поступається хітозану за вираженістю антибактеріальних властивостей, однак може бути функціоналізований шляхом введення додаткових інгредієнтів, що дає змогу нівелювати цей недолік. У складі композитних систем він також здатний підвищувати механічну стабільність і біосумісність матеріалів, що підтверджує його роль як універсального допоміжного полімеру (Huang et al., 2024).

Патентний аналіз і практичне застосування

Аналіз патентної літератури свідчить про наявність розробок, у яких каппа-карагінан використо-

вується у складі гемостатичних матеріалів. Зокрема, описані композиційні системи у вигляді гранул, порошків та ранових пов'язок, що містять карагінан у поєднанні з водорозчинними полімерними компонентами, такими як поліетиленоксид або поліетиленгліколь. Такі матеріали забезпечують швидке поглинання крові, формування гідрогелевої структури та стабілізацію згустку, що відповідає сучасним підходам до створення локальних гемостатиків.

Патентні розробки також підкреслюють можливість модифікації фізико-хімічних властивостей карагінану шляхом комбінування з іншими полімерами, зміни молекулярної маси або ступеня сульфатування, що дає змогу оптимізувати реологічні характеристики та сорбційну здатність матеріалів. Це відкриває перспективи для створення індивідуалізованих гемостатичних систем залежно від умов застосування.

Разом із тим кількість комерційно доступних продуктів, у яких карагінан виступає основним гемостатичним компонентом, залишається обмеженою. У сучасній медичній практиці домінують гемостатичні засоби на основі хітозану, альгінатів або колагену, для яких накопичено значну доказову базу щодо ефективності та безпеки (Simpson et al., 2022). Це свідчить про те, що, незважаючи на перспективні фізико-хімічні властивості карагінану, його впровадження стримується недостатньою кількістю результатів досліджень *in vivo* та клінічних випробувань.

Додатковим обмежуючим фактором є необхідність стандартизації складу та технології отримання карагінанвмісних матеріалів, а також оцінки їх довгострокової біосумісності та безпеки. Водночас

наявність патентних розробок свідчить про зростаючий інтерес до цього напрямку та потенціал комерціалізації у майбутньому.

Висновки

1. Установлено, що каппа-карагінан є перспективним біополімером морського походження, який характеризується високою здатністю до гелеутворення, біосумісністю та вираженими сорбційними властивостями.

2. Виявлено, що гемостатичний ефект матеріалів на основі каппа-карагінану реалізується переважно через фізичні механізми, зокрема абсорбцію плазми крові, концентрацію формених елементів і формування гідрогелевої бар'єрної структури.

3. Визначено, що потенційна участь каппа-карагінану в активації коагуляційного каскаду пов'язана з наявністю сульфатних груп, однак цей ефект залежить від фізико-хімічних характеристик матеріалу і потребує подальшого вивчення.

4. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що найбільш перспективним напрямом є створення

композиційних систем, у яких каппа-карагінан виконує функцію структуроутворюючої матриці у поєднанні з іншими біополімерами, зокрема хітозаном та альгінатом.

5. Наявні літературні дані свідчать, що порівняно з традиційними гемостатичними матеріалами каппа-карагінан забезпечує формування стабільних гідрогелів без вираженої активації коагуляції, що може знижувати ризик побічних ефектів.

6. Незважаючи на значну кількість експериментальних досліджень, кількість клінічно апробованих і комерційно доступних гемостатичних засобів на основі каппа-карагінану залишається обмеженою.

7. Результати проведеного аналізу доводять доцільність і перспективність подальших досліджень карагінанвмісних систем, які повинні бути спрямовані на стандартизацію складу матеріалів, оцінку їх клінічної ефективності як біополімерних гемостатичних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

- Alizadeh K., Dezvare Y., Kamyab S. et al. Development of composite sponge scaffolds based on carrageenan and cerium oxide nanoparticles for hemostatic applications. *Biomimetics*. 2023. 8(5). P. 409. Doi: 10.3390/biomimetics8050409
- Brown K.G.M., Solomon M.J. Topical haemostatic agents in surgery. *British Journal of Surgery*. 2024. 111(1). Article znad361. Doi: 10.1093/bjs/znad361
- Cai D., Weng W. Development potential of extracellular matrix hydrogels as hemostatic materials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. 11. P. 1187474. Doi: 10.3389/fbioe.2023.1187474
- Chen X., Tang J., Dong Y. et al. A novel hydrogel with inherent antibacterial and hemostatic properties for burn wound healing. *Colloids and Surfaces B: Biointerface*. 2025. 245. P. 114250. Doi: 10.1016/j.colsurfb.2024.114250
- Fan P., Zeng Y., Zaldivar-Silva D. et al. Chitosan-Based Hemostatic Hydrogels: The Concept, Mechanism, Application, and Prospects. *Molecules*. 2023. 28(3). P. 1473. Doi: 10.3390/molecules28031473
- Fang Y., Guo W., Ni P., Liu H. Recent research advances in polysaccharide-based hemostatic materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. 271(2). P. 132559. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132559
- Gheorghita D., Moldovan H., Robu A. et al. Chitosan-based biomaterials for hemostatic applications: A review of recent advances. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. 24(13). P. 10540. Doi: 10.3390/ijms241310540
- Hu B., Bao G., Xu X. et al. Topical hemostatic materials for coagulopathy. *Journal of Materials Chemistry B*. 2022. 10, P. 1946–1959. Doi: 10.1039/D1TB02523F
- Huang X., Hu B., Zhang X. et al. Recent advances in the application of clay-containing hydrogels for hemostasis and wound healing. *Expert Opinion on Drug Delivery*. 2024. 21(3). P. 457–477. Doi: 10.1080/17425247.2024.2329641
- Leng F., Liu J., Du E., Lei S., Xie C., Jiang X. and Li T. (2025) Recent progress in polysaccharide microsphere-based hemostatic material for intravascular and extravascular hemostasis: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 300, 140280. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140280
- Liu M., Jin J., Zhong X. et al. Polysaccharide hydrogels for skin wound healing. *Heliyon*. 2024. 10(15). P. e35014. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35014
- Neamtu B., Barbu A., Negrea M.O. et al. Carrageenan-Based Compounds as Wound Healing Materials. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. 23(16). P. 9117. Doi: 10.3390/ijms23169117
- Rao R.G., Kumar A.S., Prema D. et al. GO/CaCO₃/SiO₂ nanocomposite incorporated carrageenan/chitosan injectable hydrogel for enhanced hemostasis. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024. 161. P. 112024. Doi: 10.1016/j.inoche.2024.112024
- Sánchez-Roldán A., Ramos-Rubio D., Rodríguez-Mejías A. et al Effectiveness of topical hemostatic agents for management of external bleeding: a systematic review. *Sanidad Militar*. 2024. 80(2). P. 61–68. Doi: 10.4321/S1887-85712024000200003
- Sánchez del Valle F.J., Sánchez-Seco M.I., Garófano J. A comparative analysis of collagen based dressings and polysaccharide microspheres for hemostasis management in hepatic stab wounds. *Scientific Reports*. 2025. 15. P. 3802. Doi: 10.1038/s41598-024-84721-5
- Sanyal A., Roy S., Ghosh A. et al. The next frontier in hemorrhagic management: A comprehensive review on development of natural polymer-based injectable hydrogels as promising hemostatic dressings. *Chemical Engineering Journal*, 2024. 497. P. 155033. Doi: 10.1016/j.cej.2024.155033

- Shao H., Wu X., Xiao Y. et al. Recent research advances on polysaccharide-, peptide-, and protein-based hemostatic materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. 261(1). P. 129752. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129752
- Sharma A., Verma C., Singh P. et al. Alginate based biomaterials for hemostatic applications: Innovations and developments. *Int J Biol Macromol*. 2024. 264(2). P. 130771. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130771.
- Simpson A., Shukla A., Brown A.C. Biomaterials for hemostasis. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2022. 24. P. 111–135. Doi: 10.1146/annurev-bioeng-012521-101942
- Szymanski L., Gołaszewska K., Małkowska J. et al. Safety and performance of hemostatic powders. *Medical Devices: Evidence and Research*. 2023. 16. P. 133–144. Doi: 10.2147/MDER.S407838
- Xie Y., Gao P., He F. Et al. Application of alginate-based hydrogels in hemostasis. *Gels*. 2022. 8(2). P. 109. Doi: 10.3390/gels8020109
- Zhang S., Lei X., Lv Y. et al. Recent advances of chitosan as a hemostatic material: Hemostatic mechanism, material design and prospective application. *Carbohydrate Polymers*. 2024. 327. P. 121673. Doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121673
- Zhang C., Wang Y., Xue Y. et al. Enhanced hemostatic and procoagulant efficacy of PEG/ZnO hydrogels: A novel approach in traumatic hemorrhage management. *Gels*. 2024. 10(2). P. 88. Doi: 10.3390/gels10020088

REFERENCES

- Alizadeh, K. & Dezvare, Y. & Kamyab, S. & Amirian, J. & Brangule, A. & Bandere, D. (2023). Development of composite sponge scaffolds based on carrageenan and cerium oxide nanoparticles for hemostatic applications. *Biomimetics*, 8(5), 409. Doi: 10.3390/biomimetics8050409
- Brown, K.G.M & Solomon M.J. (2024). Topical haemostatic agents in surgery. *Br. J. Surg.*, 111(1), znad361. Doi: 10.1093/bjs/znad361
- Cai, D. & Weng, W. (2023). Development potential of extracellular matrix hydrogels as hemostatic materials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1187474. Doi: 10.3389/fbioe.2023.1187474
- Chen, X. & Tang, J. & Dong, Y. & Xuan, M. & Tian, Y. & Liu, Y. & Peng, N. & Cheng, B. (2025). A novel hydrogel with inherent antibacterial and hemostatic properties for burn wound healing. *Colloids and Surfaces: Biointerfaces*, 245, 114250. Doi: 10.1016/j.colsurfb.2024.114250
- Fan, P. & Zeng, Y. & Zaldivar-Silva, D. & Agüero, L. & Wang, S. (2023). Chitosan-Based Hemostatic Hydrogels: The Concept, Mechanism, Application, and Prospects. *Molecules*, 2023; 28(3), 1473. Doi: 10.3390/molecules28031473
- Fang, Y. & Guo, W. & Ni, P. & Liu, H. (2024). Recent research advances in polysaccharide-based hemostatic materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271(2), 132559. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132559
- Gheorghită, D. & Moldovan, H. & Robu, A. & Bița, A.-I. & Grosu, E. & Antoniac, A. & Corneschi, I. & Antoniac, I. & Bodog, A.D. & Băcilă, C.I. (2023). Chitosan-based biomaterials for hemostatic applications: A review of recent advances. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 10540. Doi: 10.3390/ijms241310540
- Hu, B. & Bao, G. & Xu, X. & Yang, K. (2022). Topical hemostatic materials for coagulopathy. *Journal of Materials Chemistry B*, 10, 1946–1959. Doi: 10.1039/D1TB02523F
- Huang, X. & Hu, B. & Zhang, X. & Fan, P. & Chen, Z. & Wang, S. (2024). Recent advances in the application of clay-containing hydrogels for hemostasis and wound healing. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 21(3), 457–477. Doi: 10.1080/17425247.2024.2329641
- Leng, F. & Liu, J. & Du, E. & Lei, S. & Xie, C. & Jiang, X. & Li, T. (2025). Recent progress in polysaccharide microsphere-based hemostatic material for intravascular and extravascular hemostasis: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 300, 140280. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140280
- Liu, M. & Jin, J. & Zhong, X. & Liu, L. & Tang, C. & Cai, L. (2024). Polysaccharide hydrogels for skin wound healing. *Heliyon*, 10(15), e35014. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35014
- Neamtu, B. & Barbu, A. & Negrea, M.O. & Berghea-Neamtu, C.Ș. & Popescu, D. & Zăhan, M. & Mireșan, V. (2022). Carrageenan-Based Compounds as Wound Healing Materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9117. Doi: 10.3390/ijms23169117
- Rao, R.G. & Kumar, A.S. & Prema, D. & Prakash, J. & Balashanmugam, P. & Venkatasubbu, G.D. (2024). GO/CaCO₃/SiO₂ nanocomposite incorporated carrageenan/chitosan injectable hydrogel for enhanced hemostasis. *Inorganic Chemistry Communications*. 161, 112024. Doi: 10.1016/j.inoche.2024.112024
- Sánchez-Roldán, A. & Ramos-Rubio, D. & Rodríguez-Mejías, A. & Gallego-Colón, E.J. (2024). Effectiveness of topical hemostatic agents for management of external bleeding: a systematic review. *Sanidad Militar*, 80(2), 61–68. Doi: 10.4321/S1887-85712024000200003
- Sánchez del Valle, F.J. & Sánchez-Seco, M.I. & Garófano, J. (2025). A comparative analysis of collagen based dressings and polysaccharide microspheres for hemostasis management in hepatic stab wounds. *Scientific Reports*, 15, 3802. Doi: 10.1038/s41598-024-84721-5
- Sanyal, A. & Roy, S. & Ghosh, A. & Chakraborty, M. & Ghosh, A. & Mandal, D. (2024). The next frontier in hemorrhagic management: A comprehensive review on development of natural polymer-based injectable hydrogels as promising hemostatic dressings. *Chemical Engineering Journal*, 497, 155033. Doi: 10.1016/j.cej.2024.155033
- Shao, H. & Wu, X. & Xiao, Y. & Yang, Y. & Ma, J. & Zhou, Y. & Chen, W. & Qin, S. & Yang, J. & Wang, R. & Li, H. (2024). Recent research advances on polysaccharide-, peptide-, and protein-based hemostatic materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261(1), 129752. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129752
- Sharma, A. & Verma, C. & Singh, P. & Mukhopadhyay, S. & Gupta, A. & Gupta B. (2024). Alginate based biomaterials for hemostatic applications: Innovations and developments. *Int. J. Biol. Macromol.*, 264(2), 130771. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130771
- Simpson, A. & Shukla, A. & Brown, A.C. (2022). Biomaterials for hemostasis. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 24, 111–135. Doi: 10.1146/annurev-bioeng-012521-101942

Szymanski, L. & Gołaszewska, K. & Małkowska, J. & Kaczyńska, J. & Gołębiewska, M. & Gromadka, B. & Matak, D. (2023). Safety and performance of hemostatic powders. *Medical Devices: Evidence and Research*, 16, 133–144. Doi: 10.2147/MDER.S407838

Xie, Y. & Gao, P. & He, F. & Zhang, C. (2022). Application of alginate-based hydrogels in hemostasis. *Gels*, 8(2), 109. Doi:10.3390/gels8020109

Zhang, S. & Lei, X. & Lv, Y. & Wang, L. & Wang, L.N. (2024). Recent advances of chitosan as a hemostatic material: Hemostatic mechanism, material design and prospective application. *Carbohydrate Polymers*, 327, 121673. Doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121673

Zhang, C. & Wang, Y. & Xue, Y. & Cheng, J. & Chi, P. & Wang, Z. & Li, B. & Yan, T. & Wu, B. & Wang, Z. (2024) Enhanced hemostatic and procoagulant efficacy of PEG/ZnO hydrogels: A novel approach in traumatic hemorrhage management. *Gels*, 10(2), 88. Doi: 10.3390/gels10020088

Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 03.09.2026

Конфлікт інтересів: відсутній.

Внесок авторів:

Соколовський С.І. – ідея, дизайн дослідження;

Гладишев В.В. – збір та аналіз даних;

Соколовський С.С. – участь у написанні статті;

Абрамов С.В. – участь у написанні статті;

Тітов Г.І. – участь у написанні статті;

Гоженко А.І. – участь у написанні статті;

Гарник К.В. – участь у написанні статті;

Хміль М.М. – коректування статті;

Кураченко І.П. – участь у написанні статті;

Курінний А.В. – участь у написанні статті.

Електронна адреса для листування з авторами: doctor.sokolovskiy@gmail.com