



Получение, реакции и применение солей глицидилтриметиламмония (обзор)

С.А. Соков, А.А. Голованов, Ю.Г. Борисова[✉],
Г.З. Раскильдина, Р.М. Султанова, С.А. Злотский

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Настоящий обзор ставит целью систематизацию и анализ научных данных, опубликованных за последние 50 лет, касающихся методов синтеза, химических превращений и практического применения солей глицидилтриметиламмония, которые являются перспективными катионными поверхностно-активными веществами. В статье детально рассмотрены два основных способа получения солей глицидилтриметиламмония: реакция триметиламина с эпихлоргидрином или эпибромгидрином и обработка 3-хлоро-2-гидроксипропилтриметиламмония щелочью. Наиболее распространенным является первый метод, обеспечивающий высокие выход и чистоту продукта, но требующий низких температур для минимизации побочных процессов. Основное внимание уделено реакционной способности эпоксидного цикла, который легко раскрывается под действием различных нуклеофилов: спиртов, карбоновых кислот, тиолов и аминов. Это позволяет синтезировать широкий спектр функционализированных соединений, в частности сложные эфиры с жирными кислотами, модифицированные углеводы (крахмал, целлюлозу) и другие производные. Продукты на основе солей глицидилтриметиламмония находят широкое применение благодаря введению катионного фрагмента, придающего поверхностно-активные свойства. Они добавляются в качестве эффективных компонентов в моющие средствах и косметику, применяются для создания антимикробных покрытий за счет координации наночастиц металлов, а также используются в нефтехимической отрасли в качестве экологичных стабилизаторов буровых растворов. Таким образом, соли глицидилтриметиламмония представляют собой универсальные и высокореакционноспособные промежуточные соединения для получения функциональных материалов в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: глицидилтриметиламмоний, четвертичные аммонийные соли, эпихлоргидрин, поверхностно-активные вещества, буровой раствор, эпоксиды

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR – 2025-0001 «Нефтехимические реагенты, добавки и материалы».

Для цитирования: Соков С.А., Голованов А.А., Борисова Ю.Г., Раскильдина Г.З., Султанова Р.М., Злотский С.А. Получение, реакции и применение солей глицидилтриметиламмония (обзор) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 1. С. 6–15. DOI: 10.21285/achb.1025. EDN: QCZKPN.

CHEMICAL SCIENCES

Review article

Preparation, reactions, and application of glycidyltrimethylammonium salts: a review

Sergey A. Sokov, Alexander A. Golovanov, Yulianna G. Borisova[✉],
Gulnara Z. Raskildina, Rimma M. Sultanova, Semon S. Zlotsky

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The present review aims to generalize and analyze the scientific data published over the past 50 years about the methods of synthesis, chemical transformations, and practical application of glycidyltrimethylammonium salts,

which are promising cationic surfactants. The article discusses in detail the two main methods for the preparation of glycidyltrimethylammonium salts: reaction of trimethylamine with epichlorohydrin or epibromohydrin and treatment of 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethylammonium with alkali. Although the most common first method provides the high yield and purity of the product, low temperatures are required for minimizing side processes. The main attention is paid to the reactivity of the epoxy cycle, which is easily revealed by the action of various nucleophiles: alcohols, carboxylic acids, thiols, and amines. Thus, a wide range of functionalized compounds can be synthesized, in particular esters with fatty acids, modified carbohydrates (starch, cellulose), and other derivatives. Products based on glycidyltrimethylammonium salts find a wide utility due to the introduction of a cationic fragment that imparts surfactant properties. These products are used as coordinators of metal nanoparticles in antimicrobial coatings, effective components in detergents and cosmetics, as well as environmentally friendly stabilizers of drilling fluids in the petrochemical industry. Thus, glycidyltrimethylammonium salts are versatile, high-reactive intermediates for the production of functional materials in various industries.

Keywords: glycidyltrimethylammonium, quaternary ammonium salts, epichlorohydrin, surfactants, drilling fluid, epoxides

Funding. The Ministry of Science and Education of the Russian Federation financially supported this work within the framework of the state assignment in the field of scientific activity (publication no. FEUR – 2025-0001 “Petrochemical reagents, additives and materials”).

For citation: Sokov S.A., Golovanov A.A., Borisova Yu.G., Raskildina G.Z., Sultanova R.M., Zlotskiy S.S. Preparation, reactions, and application of glycidyltrimethylammonium salts: a review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(1):6-15. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1025. EDN: QCZKPN.

ВВЕДЕНИЕ

Катионные поверхностно-активные вещества, имеющие в структуре гидрофильный и гидрофобный сегменты, широко применяются как смягчители тканей, ингибиторы коррозии, биоциды, вспомогательные вещества для текстиля и т.д. [1–5].

Одними из наиболее перспективных в ряду катионных поверхностно-активных веществ являются соли глицидилтриметиламмония **1a,b** (рис. 1).

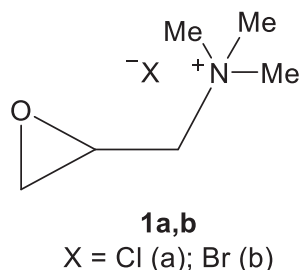


Рис. 1. Соли глицидилтриметиламмония

Fig. 1. Glycidyltrimethylammonium salts

Рассматриваемые в обзоре галогениды глицидилтриметиламмония **1a,b** являются важными промежуточными продуктами для синтеза биоразлагаемых сложноэфирных катионных поверхностно-активных веществ. Малая

токсичность их водных растворов и низкая скорость биodeградации [6] позволяет применять соли глицидилтриметиламмония для получения ион-проводящих полимеров [7], материалов для водоочистки [8], водорастворимых полимеров [9], антимикробных покрытий [10, 11], каталитически активных материалов [12] и др.

В представленном обзоре суммированы и систематизированы данные по получению и реакциям солей глицидилтриметиламмония, в основном за последние 20 лет, представленные в научных статьях. Патентная и техническая литература приведена выборочно, исходя из научной значимости предлагаемых превращений. Основное внимание уделяется химическим превращениям соединений **1a,b**, протекающим с сохранением катионного центра. В опубликованных ранее материалах [13, 14], посвященных четвертичным аммонийным солям, свойства галогенидов глицидилтриметиламмония подробно не рассматривались.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СОЛЕЙ ГЛИЦИДИЛТРИМЕТИЛАММОНИЯ

Известно два способа получения целевых солей глицидилтриметиламмония: реакция триметиламина с эпихлоргидрином (эпибромгидрином) и обработка 3-хлоро-2-гидроксипропилтриметиламмония щелочным раствором.

Традиционным способом получения хлорида (бромид) глицидилтриметиламмония (рис. 2) является реакция

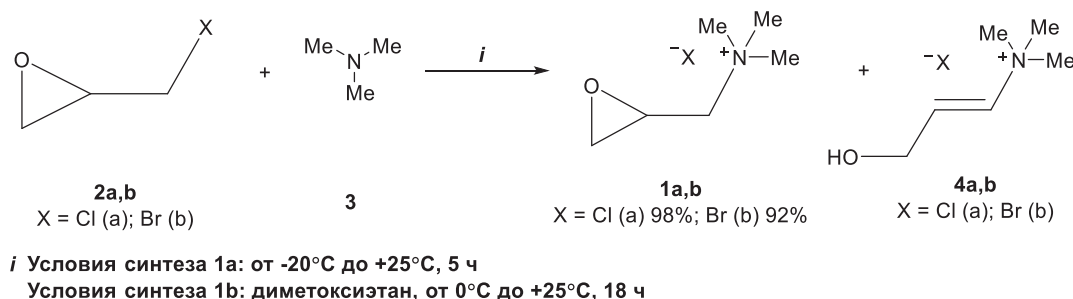


Рис. 2. Способ получения солей глицидилтриметиламмония

Fig. 2. Method for obtaining glycidyltrimethylammonium salts

между эпихлоргидрином (эпибромгидрином) и триметиламином без растворителя и катализатора [15–17]. Такой подход позволяет выделять целевой продукт с высоким выходом (до 98%) и чистотой (до 99%). Главным недостатком процесса является необходимость проводить реакцию при температуре минус 20 °С с целью получения чистого кристаллического продукта. По причине большей доступности эпихлоргидрина в подавляющем большинстве работ рассматривается получение и дальнейшее применение именно хлорида глицидилтриметиламмония.

В ряде работ предлагается использование катализаторов [18], растворителей [19, 20], ультразвука [21] для оптимизации процесса. Использование иодида калия в качестве катализатора позволяет проводить реакцию при комнатной температуре, однако приводит к снижению выхода целевого продукта до 87% [18].

Сообщалось [15], что существует возможность проведения синтеза солей без растворителя. Отмечается, что в случае отсутствия растворителя лучшими условиями будет соотношение эпихлоргидрина и триметиламина 3:1.

В то же время в ряде работ [17, 19–21] описано влияние на процесс полярных и неполярных раствори-

телей (таблица). Отметим, что температура в приведенных примерах варьируется от комнатной до температуры кипения растворителя.

Как видно из приведенных данных, увеличение полярности растворителя приводит к повышению конверсии исходного эпихлоргидрина **2a**. В неполярных растворителях, например в *n*-гексане, наблюдается низкая конверсия исходного соединения, что в совокупности с большой продолжительностью реакции делает использование подобных растворителей неэффективным. В полярных протонных растворителях (например, этиловом спирте) имеет место образование преимущественно побочного продукта – 3-гидрокси-1-пропенилтриметиламмония хлорида **4a** (см. рис. 2). Увеличение количества триметиламина, наличие значительного количества воды или окислителей [17] вызывают протекание побочных реакций (рис. 3).

Коммерчески доступный продукт **1a** содержит хлорид 3-хлоргидроксипропилтриметиламмония (< 4,0%), хлорид 2,3-дигидроксипропилтриметиламмония (< 3,5%) и некоторые другие соединения (например, следы эпихлоргидрина) в качестве примесей¹.

Альтернативным способом получения хлорида глицидилтриметиламмония является обработка хлорида

Влияние природы растворителя на выход хлорида глицидилтриметиламмония

Effect of the solvent nature on the glycidyltrimethylammonium chloride yield

Растворитель	Дипольный момент, D	Время реакции, ч	Температура проведения реакции, °С	Конверсия эпихлоргидрина 3a , %	Выход продукта 1a , %	Выход побочного продукта 4a , %
Ацетон	2,8	35	25	74	97	следы
Тетрагидрофуран	1,9	60	25	60	95	следы
Диметоксиэтан	1,4	60	25	56	97	следы
Диэтиловый эфир	1,2	60	25	40	97	следы
Этилацетат	1,8	35	77	40	67	<5
<i>n</i> -Гексан	0,0	60	69	15	98	следы
Этанол	1,7	15	78	95	20	80
Тетрахлорметан	0,0	30	25	30	76	<5

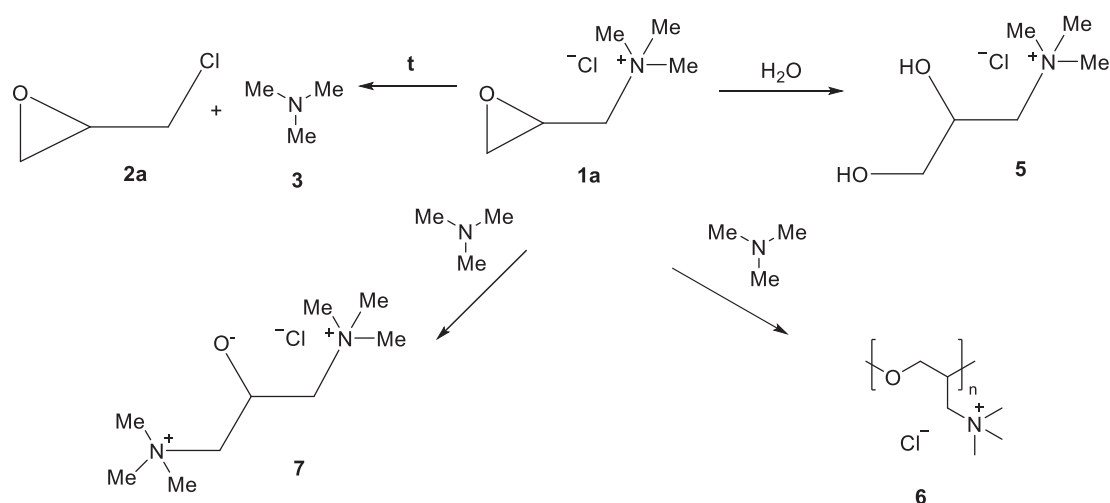


Рис. 3. Побочные реакции при синтезе глицидилтриметиламмония

Fig. 3. Side-reactions on glycidyltrimethylammonium synthesis

¹2,3-epoxypropyltrimethylammonium chloride: European union risk assessment report // Echa.europa.eu. Режим доступа: <https://echa.europa.eu/documents/10162/ad2b9958-d74b-42cf-9cb1-521f017737e1> (дата обращения: 14.01.2026).

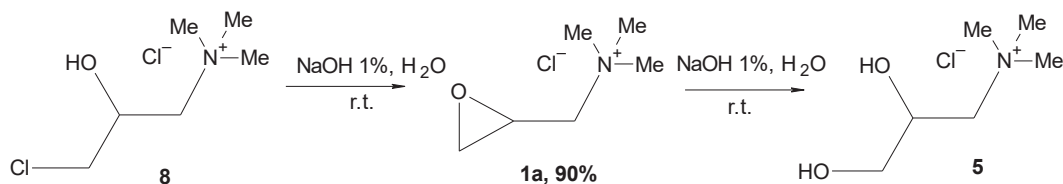


Рис. 4. Получение хлорида глицидилтриметиламмония в щелочной среде

Fig. 4. Synthesis of chloride glycidyltrimethylammonium in base medium

3-хлор-2-гидроксипропилтриметиламмония **8** водным раствором щелочи [22–25]. Помимо целевого продукта **1a** при этом может образовываться диол **5** в результате раскрытия цикла. Чаще всего представленный способ применяется для генерации эпоксидного цикла *in situ*, например при обработке тканей [25] (рис. 4).

Таким образом, в литературе описано два основных пути синтеза солей глицидилтриметиламмония, более применимым является метод, основанный на использовании коммерчески доступных эпихлоргидрина (эпибромгидрина) и триметиламина.

РЕАКЦИИ И ПРИМЕНЕНИЕ СОЛЕЙ ГЛИЦИДИЛТРИМЕТИЛАММОНИЯ

Реакционная способность солей глицидилтриметиламмония в основном обуславливается наличием эпоксидного цикла, который может легко раскрываться под действием разнообразных нуклеофильных агентов. Четвертичный аммонийный фрагмент солей глицидилтриметиламмония в описанных в литературе примерах в превращениях не участвует.

С О-нуклеофилами реакция протекает в довольно мягких условиях, с образованием эфиров. В работах [25–27] хлорид глицидилтриметиламмония **1a** применяется для модификации различных видов углеводов, в частности инулина, целлюлозы, крахмала (рис. 5).

Реакция протекает под действием водных растворов гидроксида натрия при температурах 40–80 °С и при длительной обработке реакционной массы (свыше 6 ч). Получаемые соединения **10** обладают хорошей водорас-

творимостью и поверхностной активностью, что позволяет применять их в качестве поверхностно-активных веществ. Важно отметить, что в приведенном примере возможно протекание процесса в щелочной среде с отщеплением аммонийного фрагмента и дальнейшим раскрытием и полимеризацией оксианового кольца [24].

Сходным образом хлорид глицидилтриметиламмония **1a** реагирует с карбоновыми кислотами и их производными, образуя сложные эфиры, как описано в работах [28–30]. Реакция протекает при нагреве в диапазоне 45–85 °С в полярных растворителях (ацетон, вода, изопропанол) и приводит к соответствующим сложным эфирам с выходами 87–95% в зависимости от условий и конкретной кислоты.

Наибольший интерес вызывают реакции с высшими жирными кислотами, так как они позволяют получать весьма эффективные поверхностно-активные вещества, находящие применение в промышленности и косметологии. Так, в результате реакции стеариновой кислоты **11** с хлоридом глицидилтриметиламмония **1a** при температуре 70 °С в течение 4 ч образуется эфир **12** с выходом 95% (рис. 6).

Реакция с производным фосфорной кислоты, например с додецил дигидрофосфатом **13**, протекает аналогичным образом [31]. При этом образуются бетаиновые структуры **14** с выходом 93% в водной среде при температуре 60 °С (рис. 7).

Добавление акриловой кислоты **15** к соли **1a** и трифенилфосфину в атмосфере азота при температуре 80 °С в течение 4 ч приводит к соответствующему непредельному эфиру **16** с выходом 90% [32] (рис. 8).

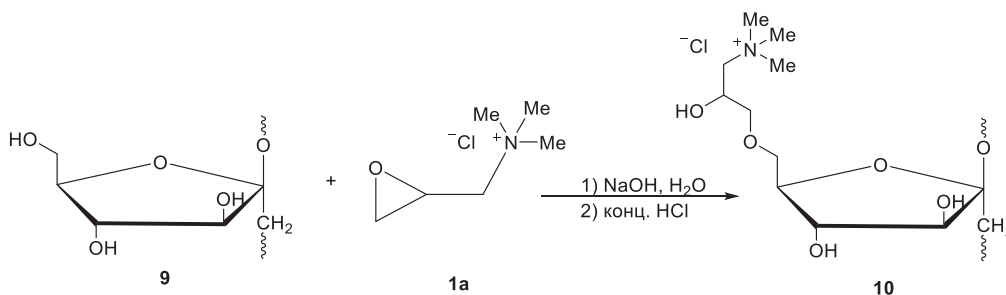


Рис. 5. Модификация углеводов с помощью глицидилтриметиламмония

Fig. 5. Carbohydrates modification via glycidyltrimethylammonium

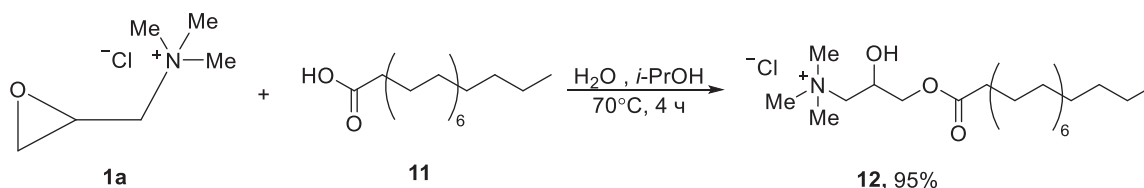


Рис. 6. Синтез поверхностно-активных веществ с использованием глицидилтриметиламмония

Fig. 6. Synthesis of surfactants via glycidyltrimethylammonium

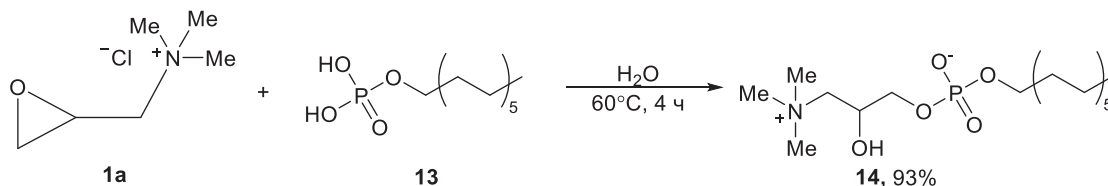


Рис. 7. Синтез бетаинов с использованием глицидилтриметиламмония

Fig. 7. Synthesis of betaines via glycidyltrimethylammonium

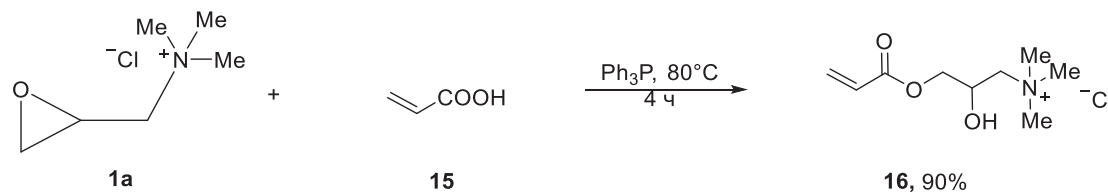


Рис. 8. Синтез непредельного эфира

Fig. 8. Synthesis of unsaturated ether

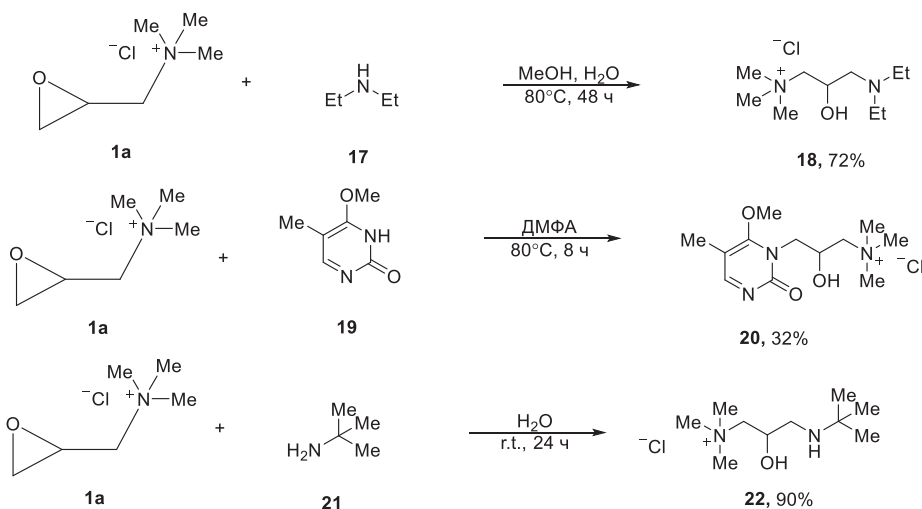


Рис. 9. Реакция с N-нуклеофилами

Fig. 9. Reactions with N-nucleophiles

С N-нуклеофилами реакция протекает региоселективно как при нагревании [33, 34], так и при комнатной температуре [35]. С диэтиламинем **17** и 5-метил-6-метокси-2-пиридин-2(1H)-оном **19** реакция проводится в полярных растворителях при повышенных температурах, а в случае трет-бутиламина **21**, несмотря на стерические эффекты, реагирует при комнатной температуре (рис. 9).

Описан синтез анионообменного сополимера воздействием хлорида глицидилтриметиламмония **1a** на аминокислотные полимеры **23** при небольшом нагревании без растворителя². Получаемые сорбенты демонстрировали значительно лучшие хроматографические характеристики, чем сорбенты с гидрофобными фрагментами (рис. 10).

Обработка продукта **1a** водным раствором ацетонциангидрина **25** при комнатной температуре (рис. 11) позволяет получить нитрильное производное карнитина **26** с выходом 84%. Эта реакция легла в основу получения

оптически чистого L-карнитина [36]. Данная реакция может быть рассмотрена как взаимодействие оксианового цикла **1a** с C-нуклеофилом – синильной кислотой, выделяющейся в результате гидролиза ацетонциангидрина.

В случае бинуклеофилов реакционная способность и направление реакции зависит от активности нуклеофильного центра, условий протекания реакции и стерической загруженности реакционного центра. Так, в случае хитозана **27** в зависимости от pH реакционной смеси реакция протекает как по $-NH_2$, так и по $-OH$ группам (рис. 12). В кислой и нейтральной среде гидроксильные группы хитозана обладают недостаточной реакционной способностью, поэтому реакция идет селективно как N-алкилирование с образованием продукта **28** с хорошими выходами. В щелочной среде реагируют обе группы, образуя продукты N- и O-алкилирования **29**³ [37, 38].

Промышленные превращения солей глицидилтриметиламмония под действием полинуклеофилов (рис. 13)

² Шукина О.И. Новые анионообменники с ковалентно привитым разветвленным гидрофильным функциональным слоем для ионной хроматографии: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.02. М., 2015. 135 с.

³ Шагдарова Б.Ц. Получение алкилированных и ацилированных производных хитозана и исследование их биологических свойств: дис. ... канд. биол. наук: 03.01.06. М., 2016. 135 с.

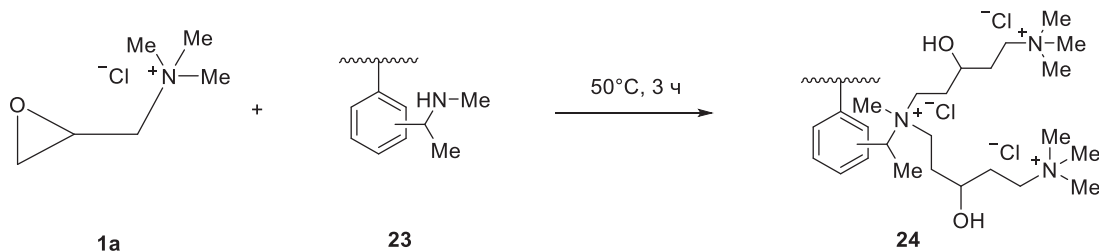


Рис. 10. Синтез полимерной структуры

Fig. 10. Glycidyltrimethylammonium application in polymer synthesis

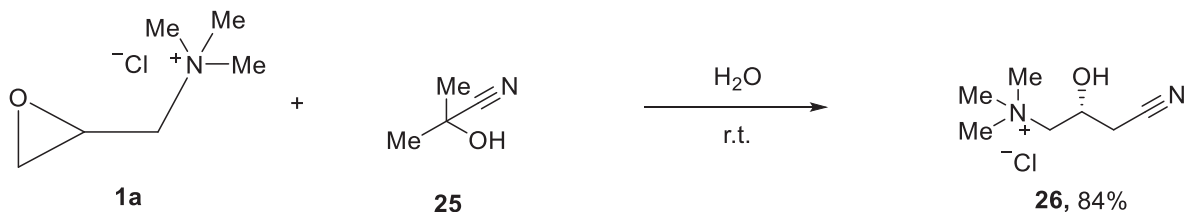


Рис. 11. Этап получения оптически чистого L-карнитина

Fig. 11. Stage of obtaining optically pure L-carnitine

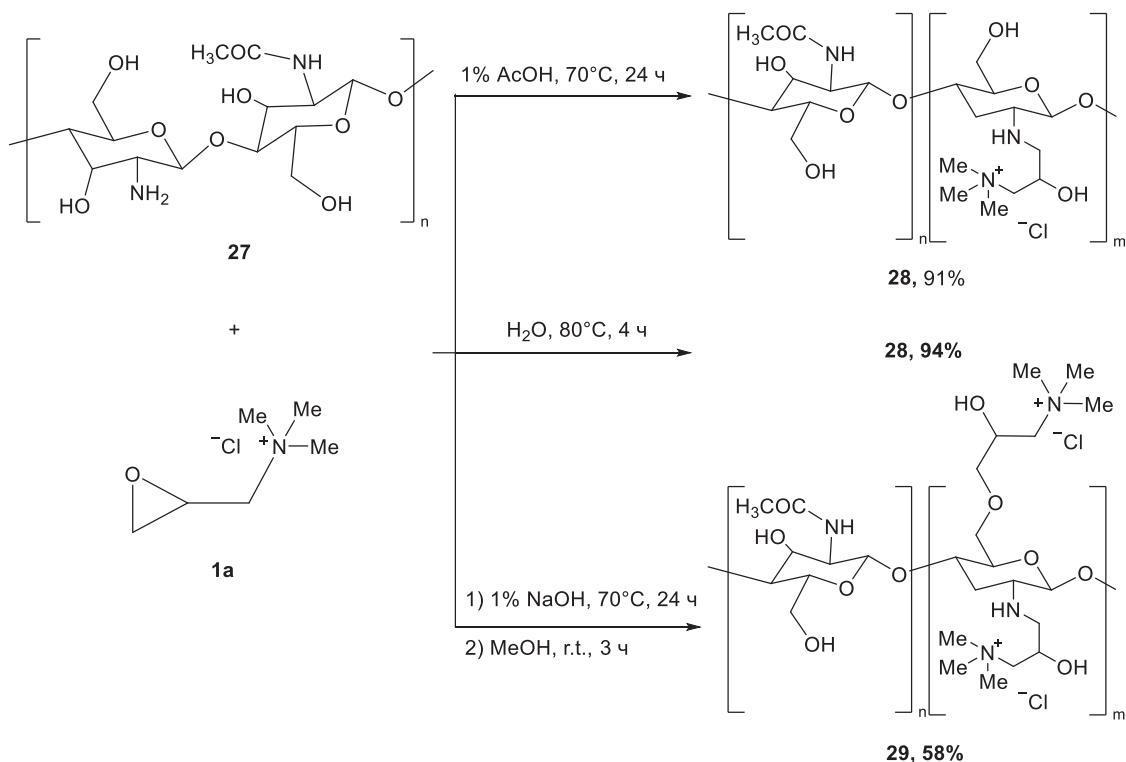


Рис. 12. Реакция с бинуклеофилами

Fig. 12. Reaction with binucleophiles

описаны в патентах [39, 40]. Реакция протекает региоселективно по SH-группе соединения **30**, при этом аминогруппа не требует дополнительных защитных групп для управления селективностью процесса.

В случае 3-((2-гидроксиэтил)амино)пропан-1-сульфоновой кислоты **32** (рис. 14), содержащей несколько реакционных центров, реакция идет селективно по NH группе, приводя к региоселективному образованию разветвленного амина **33** с 76%-м выходом [41].

Отметим, что в рассмотренных примерах соли глицидилтриметиламмония **1a,b** с точки зрения реак-

ционной способности рассматриваются как функционализированные оксираны, позволяющие вводить в молекулу четвертичный аммонийный фрагмент. Во всех случаях в продуктах превращения присутствует вторичная гидроксильная группа. Повышенная температура и длительное время реакции необходимы для достижения полной конверсии.

Большая часть областей применения продуктов на основе солей глицидилтриметиламмония связана с их высокой поверхностной активностью. Так, в работах [26, 30, 31] доказана высокая моющая способность соеди-

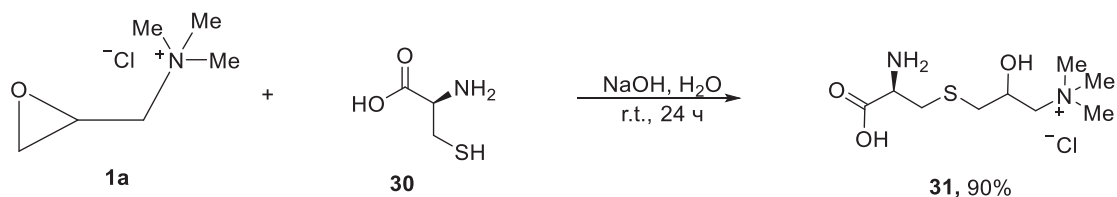


Рис. 13. Реакция с полинуклеофилами

Fig. 13. Reaction with polynucleophiles

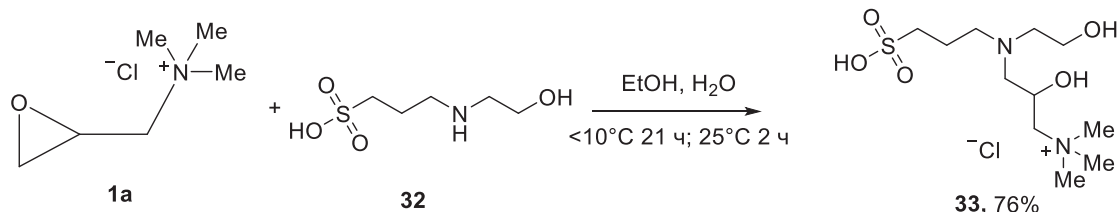


Рис. 14. Реакция с N-замещенной пропан-1-сульфоновой кислотой

Fig. 14. Reaction with N-substituted propane-1-sulfonic acid

нений типа **12**, **14** и их аналогов, что обуславливает их применение в косметической промышленности [40].

Также соли глицидилтриметиламмония находят применение при производстве новых материалов, в частности наночастиц серебра и золота [10, 11, 42, 43]. Отмечены высокие антибактериальные свойства продуктов и материалов на основе солей глицидилтриметиламмония [10, 11]. Показана возможность применения модифицированных углеводов типа **10** [25–27] в нефтепромысловой химии. В частности, указано [44–48], что подобные поликатионные структуры являются эффективными и экологически безопасными стабилизаторами буровых растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным методом синтеза солей глицидилтриметиламмония является реакция эпихлоргидрина (эпибромгидрина) с триметиламином при охлаждении,

обеспечивающая высокие выход (до 98%) и чистоту (до 99%). Фактором, определяющим реакцию способность этих солей, является эпиксидный цикл, легко раскрывающийся под действием нуклеофилов.

Продукты, полученные на основе солей глицидилтриметиламмония, находят широкое применение благодаря присутствию катионного фрагмента, придающего поверхностно-активные свойства. Этим обуславливается их использование в качестве эффективных поверхностно-активных веществ в моющих средствах и косметике, а также при создании антимикробных покрытий (координация наночастиц металлов). У солей глицидилтриметиламмония имеется хороший потенциал использования в области фармации и медицинской химии. Перспективным направлением является применение катионизированных полимеров (например, крахмала, целлюлозы) в нефтепромысловой химии в качестве стабилизаторов буровых растворов.

REFERENCES

1. Han L., Zhang Y., Li H., Li L. The synthesis and surface activity of perfluoro-2, 5-dimethyl-3, 6-dioxanonanoic acid ester fluorocarbon surfactants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009;334(1-3): 176-180. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2008.10.020.
2. Zhang Q., Gao Z., Xu F., Tai S. Effect of hydrocarbon structure of the headgroup on the thermodynamic properties of micellization of cationic gemini surfactants: an electrical conductivity study. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2012;371(1):73-81. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.12.076.
3. Wang Q., Qiu H., Han H., Liu X., Jian S. Two-step stacking by sweeping and micelle to solvent stacking using a long chain cationic ionic liquid surfactant. *Journal of Separation Science*. 2012;35(4):589-595. DOI: 10.1002/jssc.201100759.
4. Zhu M., Chai J., Chen L., Xu L., Liu W., Shang S., et al. Synergetic effect of cationic surfactive ionic liquid C₁₂mimBr and anionic surfactant SDBS on the phase behavior and solubilization of microemulsions. *Fluid Phase Equilibria*. 2012;314:90-94. DOI: 10.1016/j.fluid.2011.10.023.
5. Diao Z., Li L., Wang Z., Lu J., Zhou W. Studies in the phase behavior of the microemulsions formed by mixed cationic and nonionic surfactants. *Colloid Journal*. 2011;73:626-634. DOI: 10.1134/S1061933X1105022X.
6. Tehrani-Bagha A.R., Holmberg K. Cationic ester-containing gemini surfactants: physical-chemical properties. *Langmuir*. 2010;26(12):9276-9282. DOI: 10.1021/la1001336.
7. Matsumoto K., Endo T. Synthesis of ion conductive networked polymers based on an ionic liquid epoxide having a quaternary ammonium salt structure. *Macromolecules*. 2009;42(13):4580-4584. DOI: 10.1021/ma900508q.
8. Wahlström R., Kalliola A., Heikkinen J., Kyllönen H., Tamminen T. Lignin cationization with glycidyltrimethylammonium chloride aiming at water purification applications. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:188-194. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.026.
9. Rwei S.-P., Chen Y.-M., Lin W.-Y., Chiang W.-Y. Synthesis and rheological characterization of water-soluble glycidyltrimethylammonium-chitosan. *Marine Drugs*. 2014;12(11):5547-5562. DOI: 10.3390/md12115547.
10. Kang C., Kim S.S., Ahn D., Kim S.J., Lee J. Effective surface attachment of Ag nanoparticles on fibers using

- glycidyltrimethylammonium chloride and improvement of antimicrobial properties. *RSC Advances*. 2017;7(38):23407-23414. DOI: 10.1039/C7RA01636K.
11. Kang C., Ahn D., Roh C., Kim S.S., Lee J. Development of synergistic antimicrobial coating of p-aramid fibers using ag nanoparticles and glycidyltrimethylammonium chloride (GTAC) without the aid of a cross-linking agent. *Polymers*. 2017;9(8):357. DOI: 10.3390/polym9080357.
 12. Mukhayani F., Kamiya Y., Otomo R., Kunarti E.S., Nuryono N. Modification of chitosan-coated magnetic material with glycidyltrimethylammonium chloride and its application as heterogeneous base catalyst for levulinic acid esterification. *Materials Advances*. 2024;5(9):3838-3849. DOI: 10.1039/D4MA00181H.
 13. Zhang C., Cui F., Zeng G., Jiang M., Yang Z., Yu Z., et al. Quaternary ammonium compounds (QACs): a review on occurrence, fate and toxicity in the environment. *Science of the Total Environment*. 2015;518-519:352-362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.007.
 14. Zhou Z., Zhou S., Zhang X., Zeng S., Xu Y., Nie W., et al. Quaternary ammonium salts: insights into synthesis and new directions in antibacterial applications. *Bioconjugate Chemistry*. 2023;34(2):302-325. DOI: 10.1021/acs.bioconjchem.2c00598.
 15. McClure J.D. Glycidyltrimethylammonium chloride and related compounds. *The Journal of Organic Chemistry*. 1970;35(6):2059-2061. DOI: 10.1021/jo00831a093.
 16. Burness D.M. Anomalous reaction of epichlorohydrin with trimethylamine. *The Journal of Organic Chemistry*. 1964;29(7):1862-1864. DOI: 10.1021/jo01030a047.
 17. Miao Z., Wang F., Deng D. Preparation of hyperactive etherifying agent of glycidyltriethylammonium chloride. In: 2013 *International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*. Chengdu: IEEE; 2013, vol. 2, p. 601-603. DOI: 10.1109/ICMREE.2013.6893745.
 18. Peng F., Lin L., Fang N.-H. Study on catalytic synthesis of 2,3-epoxypropyl trimethyl ammonium chloride by using potassium iodide as catalyst. *Xiandai Huagong (Modern Chemical Industry)*. 2010;30(1):66-67.
 19. Liu J., Li Z., Huang X. Synthesis of 2,3-epoxypropyl trimethyl ammonium chloride. *Speciality Petrochemicals*. 2008;25(1):28-31.
 20. Guo N. Synthesis and characterization of cationic surfactant 3-dodecyloxy-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (D HTAC). *Pige Yu Huagong*. 2013;30:10-13.
 21. Yang N., Zheng J. Synthesis and characterization of new etherification agent epoxypropyl trimethyl ammonium chloride (GTA) under ultrasonic conditions. *Pige Yu Huagong*. 2011;28(1):5-7.
 22. Zheng T., Zheng D., Li X., Cai C., Lou H., Liu W., et al. Synthesis of quaternized lignin and its clay-tolerance properties in montmorillonite-containing cement paste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017;5(9):7743-7750. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b01217.
 23. Pinto P.I., Magina S., Budjav E., Pinto P.C., Liebnier F., Evtuguin D. Cationization of eucalyptus kraft LignoBoost lignin: preparation, properties, and potential applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022;61(10):3503-3515.
 24. Wang X., Liu Z., Wang S., Kong F., Yang G., Fatehi P., Lucia L.A. Enhancing the Alkaline Peroxide Mechanical Pulp Strength by Cationization with 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride. *BioResources*. 2017;12(4):244-248.
 25. Rahul R., Kumar S., Jha U., Sen G. Cationic inulin: a plant based natural biopolymer for algal biomass harvesting. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2015;72:868-874. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.09.039.
 26. D'Avino M., Chilton R., Gang S., Sivik M.R., Fulton D.A. Evaluating the role of hydrophobic and cationic appendages on the laundry performance of modified hydroxyethyl celluloses. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022;61(38):14159-14172. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c01698.
 27. Bendoraitiene J., Kavaliauskaite R., Klimaviciute R., Zemaitaitis A. Peculiarities of starch cationization with glycidyltrimethylammonium chloride. *Starch-Stärke*. 2006;58(12):623-631. DOI: 10.1002/star.200600541.
 28. Guo N. Synthesis and characterization of N,N,N-trimethyl-2-hydroxy-3-stearoyloxy-propylammoniumchloride. *International Journal of Pharmaceutics*. 2010;393(1-2):268-272.
 29. Wilke M.S., French M.A., Goh Y.K., Ryan E.A., Jones P.J., Clandinin M.T. Synthesis of specific fatty acids contributes to VLDL-triacylglycerol composition in humans with and without type 2 diabetes. *Diabetologia*. 2009;52(8):1628-1637. DOI: 10.1007/s00125-009-1405-9.
 30. Yang J., Guo Y., Li H. Biodegradation of N,N,N-trimethyl-2, 3-bis (stearoyloxy)-propylammonium chloride (CDESA). *Fine Chemicals-Dalian*. 2007;24(3):287.
 31. Kurosaki T., Masuda M., Yamaki K. Synthesis and physicochemical properties of amphiphilic phosphobetaine: alkyl 2-hydroxy-3-trimethylammoniopropyl phosphates (Cn-AHTMAP). *Nippon Kagaku Kaishi*. 1990;11:1297-1301.
 32. Birtane H., Şen F., Bozdağ B., Kahraman M.V. Antibacterial UV-photocured acrylic coatings containing quaternary ammonium salt. *Polymer Bulletin*. 2021;78:3577-3588. DOI: 10.1007/s00289-020-03287-0.
 33. Pomeisl K., Votruba I., Holí A., Pohl R. Syntheses of base and side-chain modified pyrimidine 1-[2-(phosphonomethoxy) propyl] derivatives as potent inhibitors of thymidine phosphorylase (PD-ECGF) from SD-lymphoma. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*. 2006;71(4):595-624.
 34. Steric-hindrance amine ionic liquid and preparation thereof. Patent. CN no. 102898318; 2013.
 35. Zhang C., Li Y., Xing S., Yang X., Zhao J., Dong Q. Studies on Intermolecular Interaction of N-glycidyltrimethyl ammonium chloride modified chitosan/N,N-dimethyl-N-dodecyl-N-(2,3-epoxy propyl) ammonium chloride and curcumin delivery. *Polymers*. 2022;14(10):1936. DOI: 10.3390/polym14101936.
 36. Voeffray R., Perlberger J.-C., Tenud L., Gosteli J. L-Carnitine. Novel synthesis and determination of the optical purity. *Helvetica Chimica Acta*. 1987;70(8):2058-2064. DOI: 10.1002/hlca.19870700811.
 37. Gruškieienė R., Deveikytė R., Makuška R. Quaternization of chitosan and partial destruction of the quaternized derivatives making them suitable for electrospinning. *Chemija*. 2013;24(4):455-459. DOI: 10.6001/chemija.2013.24.4.10.
 38. Lim S.H., Hudson S.M. Synthesis and antimicrobial activity of a water-soluble chitosan derivative with a fiber-reactive group // *Carbohydrate Research*. 2004. Vol. 339, no. 2. P. 313-319. DOI: 10.1016/j.carres.2003.10.024.
 39. Phenolic hydroxyl ionic water-based polyamide imide containing reactive groups and preparation method thereof. Patent CN no. 115260495; 2022.

40. Buffer compounds. Patent US no. 20120129240; 2012.

41. Self-emulsifying ionic water-based polyamide imide and preparation method thereof, carbon fiber sizing agent and preparation method and application thereof. Patent CN no. 114561011; 2022.

42. Lu C., Zhang Y.-Y., Zhu X.-F., Yang G.-W., Wu G.-P. Simultaneous activation of carbon dioxide and epoxides to produce cyclic carbonates by cross-linked epoxy resin organocatalysts. *ChemCatChem*. 2023;15(10):e202300360. DOI: 10.1002/cctc.202300360.

43. Malviya R., Sharma P.K., Dubey S.K. Modification of polysaccharides: pharmaceutical and tissue engineering applications with commercial utility (patents). *Materials Science and Engineering: C*. 2016;68:929-938. DOI: 10.1016/j.msec.2016.06.093.

44. Lee S., Lee J. Antibacterial coating of glass fiber filters with silver nanoparticles (AgNPs) and glycidyltrime-

thylammonium chloride (GTAC). *Fibers and Polymers*. 2018;19:2080-2087. DOI: 10.1007/s12221-018-8107-1.

45. Lee S., Sul I.H., Lee J. Attachment of silver nanoparticles to the wool fiber using glycidyltrimethylammonium chloride (GTAC). *Textile Coloration and Finishing*. 2016;28(2):70-76. DOI: 10.5764/TCF.2016.28.2.70.

46. Dos Santos Cescon L., Quartarone P., da Silva Ribeiro S.P., Veiga Nascimento R.S. Cationic starch derivatives as reactive shale inhibitors for water-based drilling fluids. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018;135(33):46621.

47. Warren B., van der Horst P., Stewart W. Application of amphoteric cellulose ethers in drilling fluids. In: *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. SPE; 2003, p. 1-11. DOI: 10.2118/80210-MS.

48. Fan Y., Picchioni F. Modification of starch: a review on the application of "green" solvents and controlled functionalization. *Carbohydrate Polymers*. 2020;241:116350. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116350.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соков Сергей Александрович,

к.х.н., младший научный сотрудник,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
s.a.sokov.tltsu@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0639-0455>

Голованов Александр Александрович,

д.х.н., главный научный сотрудник,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
aleksandgolovanov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8592-3984>

Борисова Юлианна Геннадьевна,

к.х.н., доцент,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
✉ yulianna_borisova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6452-9454>

Раскильдина Гульнара Зинуровна,

д.х.н., профессор, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
graskildina444@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9770-5434>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Sokov,

Cand. Sci. (Chemistry), Junior Researcher,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
s.a.sokov.tltsu@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0639-0455>

Alexander A. Golovanov,

Dr. Sci. (Chemistry), Chief Researcher,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
aleksandgolovanov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8592-3984>

Yulianna G. Borisova,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
✉ yulianna_borisova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6452-9454>

Gulnara Z. Raskildina,

Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
graskildina444@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9770-5434>

Султанова Римма Марсельевна,

д.х.н., профессор, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
rimmams@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6719-2359>

Rimma M. Sultanova,

Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
rimmams@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6719-2359>

Злотский Семен Соломонович,

д.х.н., профессор, заведующий кафедрой,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
nocturne@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6365-5010>

Semon S. Zlotsky,

Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
Head of the Department,
Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
nocturne@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6365-5010>

Вклад авторов

С.А. Соков – проведение исследования.
А.А. Голованов – формальный анализ.
Ю.Г. Борисова – редактирование рукописи.
Г.З. Раскильдина – административное
руководство исследовательским проектом,
предоставление ресурсов.
Р.М. Султанова – написание
черновика рукописи.
С.С. Злотский – разработка концепции,
разработка методологии, курирование данных.

Contribution of the authors

Sergey A. Sokov – investigation.
Alexander A. Golovanov – formal analysis.
Yulianna G. Borisova – editing.
Gulnara Z. Raskildina – project administration,
resources.
Rimma M. Sultanova – writing – original draft.
Semon S. Zlotsky – conceptualization,
methodology, data curation.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили
Окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read
and approved by all the co-authors.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 14.07.2025.
Одобрена после рецензирования 08.12.2025.
Принята к публикации 05.03.2026.

Information about the article

*The article was submitted 14.07.2025.
Approved after reviewing 08.12.2025.
Accepted for publication 05.03.2026.*