

**В. А. Старцева, И. В. Федонина, Л. Е. Никитина, Л. Ю. Беляева,
И. Р. Гильфанов, А. С. Симакова, О. Т. Шипина, Р. Ф. Ахвердиев,
Н. В. Аверьянова, Е. А. Сарбазян, Д. М. Пастеляк, А. В. Герасимов**

МОНО-, ДИ- И ТРИСУЛЬФИДЫ НА ОСНОВЕ СТЕРЕОИЗОМЕРНЫХ ЭПИТИОКАРАНОВ

Ключевые слова: α - и β -3,4-эпителикараны, бифункциональные тиолы, моно-, ди- и трисульфиды.

Ранее нами были описаны регио- и стереоселективные реакции 3,4-эпителикаранов с тиолами и тиофенолом в основной среде, которые привели к образованию 4-алкил(арил)тиокаран-3-олов с транс-расположением сульфгидрильной и сульфидной групп. В данной работе описываются особенности химического поведения эписульфидов каранового ряда с пренилмеркаптаном, 2-меркаптоэтанолом и меркаптоуксусной кислотой. Синтез новых моно-, ди- и трисульфидов каранового ряда проводился в присутствии этилата натрия и ДМСО, структура очищенных колоночной хроматографией на силикагеле продуктов установлена на основании данных ИК- и ПМР-спектроскопии, состав подтвержден данными элементного и рентгеноструктурного анализа. Реакция β -3,4-эпителикарана с пренилмеркаптаном завершается образованием двух соединений в соотношении 1:1,8: помимо ранее описанного в реакциях с алкантиолами "нормального" аддукта транс-присоединения, также образуется продукт его окисления - дисульфид с двумя терпеновыми фрагментами. Реакции стереоизомерных α - и β -3,4-эпителикаранов с 2-меркаптоэтанолом в каждом случае приводят к образованию двух тиопроизводных карановой структуры - "нормального" аддукта транс-присоединения 1 моля серосодержащего реагента (моно-аддукт с 2 атомами серы) и дисульфида с двумя меркаптоэтанольными фрагментами (бис-аддукт с 3 атомами серы). Реакции стереоизомерных эпителикаранов с меркаптоуксусной кислотой были проведены в условиях нагревания (90°C) и через 60 ч завершились образованием единственного продукта только в случае β -тиооксида 3-карена. Структура кристаллического продукта установлена методом РСА. Обсуждается конструктивная схема образования трисульфида тиетановой структуры, в котором два карановых фрагмента соединены через три атома серы.

**V. A. Startseva, I. V. Fedyunina, L. E. Nikitina, L. Yu. Belyaeva,
I. R. Gilfanov, A. S. Simakova, O. T. Shipina, R. F. Akhverdiev,
N. V. Averianova, E. A. Sarbazyan, D. M. Pastelyak, A. V. Gerasimov**

MONO-, DI- AND TRISULFIDES BASED ON STEREOISOMERIC EPITHIOCARANES

Keywords: α - and β -3,4-epithiocarans, bifunctional thiols, di- and trisulfides.

Earlier we have described regio- and stereoselective reactions of 3,4-epithiocarans with thiols and thiophenol in alkaline media, that resulted in the formation of a 4-alkyl(aryl)thiocaran-3-ols with trans-position of the sulfhydryl and sulfide groups. In this paper, features of chemical behavior of caran-series episulfides with prenyl mercaptan, 2-mercaptoethanol and mercaptoacetic acid have been described. Synthesis of new caran-series mono-, di- and trisulfides were carried out in the presence of sodium ethylate and DMSO, structures of products purified by column chromatography on silica gel were established on the basis of IR- and ¹H NMR-spectroscopy data, composition is confirmed by elemental and X-ray structural analysis data. Reaction of 3,4-epithiocaran with prenyl mercaptan ends with the formation of two compounds in a 1:1,8 ratio: besides earlier described "normal" adduct of trans- addition in reactions with alkan thiols, also formed its oxidation product – disulfide with two terpene fragments. Reactions of stereoisomeric α - and β - 3,4-epithiocarans with 2- mercaptoethanol leads to the formation of two caran-series thio-derivatives – "normal" adduct of trans- addition of 1 mol sulfur-containing reagent (mono-adduct with 2 sulfur atoms) and disulfide with two mercaptoacetic fragments (bis-adduct with 3 sulfur atoms) in each case. Reactions of stereoisomeric epithiocarans with mercaptoacetic acid were carried out under heating conditions (90°C) and after 60 hours ended with the formation of the single product only in the case β -thiooxide of 3-carene. The structure of the crystalline product was established by X-ray diffraction. The constructive scheme of formation of a trisulfide of thietane structure, in which two carane fragments are connected through three sulfur atoms, is discussed.

Введение

В предыдущих исследованиях были описаны реакции стереоизомерных тиооксидов 3-карена с рядом тиолов - метантиолом, этантиолом, изопропантиолом, бутантиолом и тиофенолом, которые проводились в присутствии основного катализатора (тиолята или этилата натрия), в среде ДМСО, при комнатной температуре. Показано, что в основной среде трехчленное тирановое кольцо бициклических эписульфидов раскрывается регио- и стереоселективно с образованием 4-алкил(арил)тиокаран-3-олов с транс-расположением сульфгидрильной и

сульфидной групп, за исключением реакции α -3,4-эпителикарана с тиофенолом, в которой вместо ожидаемого терпенсульфида образовался дифенилдисульфид [1].

С целью расширения синтетических подходов к получению соединений тиранового ряда в реакциях нуклеофильного присоединения, нами было продолжено исследование химического поведения эписульфидов каранового ряда. В качестве нуклеофильных агентов были использованы пренилмеркаптан и бифункциональные тиолы - 2-меркаптоэтанол и меркаптоуксусная кислота.

Экспериментальная часть

В ходе исследований были использованы терпеновые соединения, поставляемые компаниями *Fluka* и *Acros organics*, а также серосодержащие реактивы производства *Aldrich*. Синтез 3,4-эпителикаранов проводился согласно описанной в работе [2] методике. Все использованные растворители прошли предварительную подготовку в соответствии с общепринятыми процедурами [3]. Спектры ЯМР в CDCl_3 измерены на спектрометре UNITY-300 фирмы Varian (рабочая частота на ядрах водорода 300 МГц), ИК спектры - на спектрометре Specord-75 IR.

Получение соли S-пренилизотиуриония. В реакционную систему из трехгорлой круглодонной колбы на 300 мл с капельной воронкой и обратным холодильником с хлоркальциевой трубкой для осушки, загружали тиомочевину (22.8 г, 0.3 моль), предварительно растворенную в 80 мл этилового спирта (абс.), после чего нагревали до температуры 60°C, а затем при перемешивании через капельную воронку постепенно добавляли пренилхлорид (31.3 г, 0.36 моль). После растворения тиомочевины нагревание прекратили. Охлажденную до комнатной температуры реакционную смесь отфильтровали, а образовавшиеся кристаллы S-пренилизотиуриониевой соли промыли эфиром. Масса полученной соли - 32 г, что соответствует 60% выходу.

Синтез пренилмеркаптана. В круглодонную колбу объемом 250 мл, снабженную обратным холодильником, помещали 32 г соли S-пренилизотиуриония и 150 мл 15% раствора гидроксида калия. Реакционную смесь кипятили в течение 2 часов (ТСХ контроль), затем подкисляли 3% раствором соляной кислоты до слабощелочной реакции и экстрагировали эфиром. Объединенные эфирные вытяжки промыли водой, сушили с использованием сульфата натрия, отогнали растворитель и очистили пренилмеркаптан вакуумной перегонкой. Т.кип. 55-56 °С (при 55 мм рт.ст.), выход - 10.3 г, что соответствует 57%.

Взаимодействие α - и β -3,4-эпителикаранов с пренилмеркаптаном и 2-меркаптоэтанолом.

Тиолят натрия синтезировали в трехгорлой колбе, оборудованной мешалкой, обратным холодильником, хлоркальциевой трубкой и капельной воронкой, путем взаимодействия 0.0086 моль натрия с 0.089 моль меркаптана (2-меркаптоэтанола или пренилмеркаптана). Пренилмеркаптан (0.688 М) получали предварительно нагреванием смеси 250 г 20% раствора гидроксида натрия и 150 г соли S-пренилизотиуриония при 100°C. К образовавшемуся тиоляту натрия при перемешивании добавляли 0.0089 моль α - или β -тиоокиси 3-карена **1,6** и 2 мл ДМСО. Реакционную смесь выдерживали при комнатной

температуре в условиях перемешивания на протяжении 15 часов. Ход реакции контролировали методом тонкослойной хроматографии (ТСХ). Для выделения продуктов реакционную смесь подвергли экстракции диэтиловым эфиром после предварительного разбавления водой. Объединенные эфирные экстракты последовательно промывали насыщенным водным раствором хлорида аммония и дистиллированной водой до нейтральной реакции среды, затем органический слой осушали безводным сульфатом натрия. Растворитель удаляли в вакууме, остаточные продукты очищали методом колоночной хроматографии на силикагеле, достигая выходов в диапазоне 74-82%.

Взаимодействие β -3,4-эпителикарана с меркаптоуксусной кислотой. Этилат натрия получали из 0.56 г (0.024 М) натрия и 20 мл этилового спирта (абс.) в колбе, снабженной мешалкой, капельной воронкой и обратным холодильником с хлоркальциевой трубкой. К образовавшемуся этилату натрия при комнатной температуре и постоянном перемешивании добавляли по каплям 1.1 г (0.012 М) меркаптоуксусной кислоты. В результате реакции выпал белый осадок динатрия сульфидацетата. К полученному осадку добавили 2.0 г (0.012 М) α - или β -тиоокиси 3-карена **1,6** и 2 мл ДМСО. Реакционную смесь кипятили при 90°C и перемешивали в течение 60 часов. По завершении реакции (ТСХ-контроль) реакционную смесь выливали в воду, подкисляли 3% раствором соляной кислоты до pH=3.0, после чего экстрагировали диэтиловым эфиром. Для сушки объединенных эфирных вытяжек применяли сульфат натрия. Образовавшиеся кристаллы очищали методом перекристаллизации (этанол). Полученный продукт имел температуру плавления 147-148°C и выход 57% (**9**). Физические константы и спектральные данные моно-, ди- и трисульфидов каранового ряда можно найти в источниках [4-6].

Результаты и их обсуждение

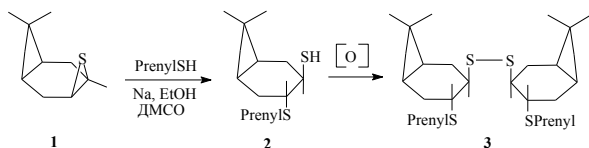
Для синтеза тиопренильных производных каранового ряда нами была использована соль S-пренилизотиуриония, предварительно полученная нагреванием тиомочевины с пренилхлоридом. На следующем этапе синтетической методики действием 15%-го раствора КОН на соль S-пренилизотиомочевину был получен пренилмеркаптан, очищенный вакуумной перегонкой.

Реакция β -3,4-эпителикарана **1** с пренилмеркаптаном $(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CHCH}_2\text{SH}$ в условиях двукратного избытка тиола в присутствии этилата натрия и ДМСО протекала достаточно легко при комнатной температуре и по данным ГЖХ реакционной смеси полностью завершилась образованием двух продуктов **2,3** в соотношении 1:1,8. Оба соединения в виде

мажлянистых жидкостей были выделены методом колоночной хроматографии на силикагеле в соотношении 1:2,2 (**2,3**).

Структурные характеристики полученных соединений были детально изучены с использованием комплекса физико-химических методов, включая ИК- и ПМР-спектроскопию. Достоверность состава подтверждена результатами элементного анализа.

Стереохимические особенности и направление раскрытия тиранового цикла были выявлены путем сравнения с известными о реакциях тиоокисей 3-карена с рядом алкантиолов и тиофенолом [1].



Спектры ПМР соединений **2** и **3** демонстрируют идентичный набор сигналов следующих структурных фрагментов: мультиплет протонов циклопропанового кольца в диапазоне 0.6-0.8 м.д., синглеты протонов *gem*-диметильной группы в области 0.93, 1.00 м.д., метильной группы при C-3 (1.33 м.д.) и *gem*-диметильной группы пренильного фрагмента при C=C связи (1.70-1.73 м.д.), дублет (8.7 Гц) протонов метиленовой группы тиопренильного фрагмента в области 3.20 м.д. и триплет олефинового протона (4.93 м.д.). Отличительной особенностью спектра соединения **2** является синглетный сигнал протона сульфгидрильной группы в области 2.36 м.д.

При анализе интенсивностей сигналов в ПМР-спектре соединения **3** было установлено присутствие каранового фрагмента и тиопренильной группы в соотношении ~1:1. Данные элементного анализа аддукта **3** соответствуют брутто-формуле C₃₀H₅₀S₄.

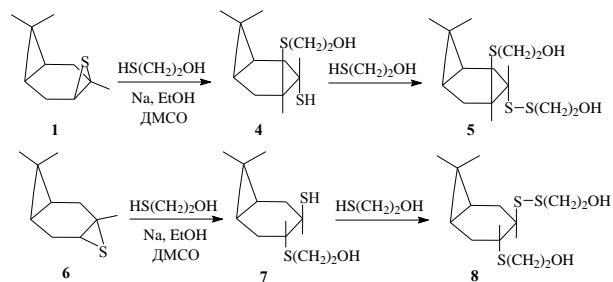
Данные ИК-спектроскопии соединения **2** позволили обнаружить типичные полосы поглощения, указывающие на присутствие тиопренильного фрагмента - это сульфгидрильная группа (2560 см⁻¹) и кратная связь (1670 см⁻¹). Анализ данных ИК-спектроскопии продуктов **2** и **3** показал отсутствие полосы характеристических колебаний связи SH у соединения **3** и абсолютную идентичность области "отпечатков пальцев" этих соединений.

На основании совокупности полученных данных соединению **2** была приписана структура 4α-пренилтиокаран-3β-тиола, а также было выдвинуто предположение, что соединение **3** является его окисленной формой - ди(4α-пренилтиокаранил)3β-дисульфидом. По всей видимости, образование дисульфида **3** начинается еще в реакционной смеси, а накопление продолжается на хроматографической колонке. Этим можно объяснить увеличение количества дисульфида **3** после очистки реакционной смеси

методом колоночной хроматографии на силикагеле.

В рамках дальнейших исследований синтетического потенциала бициклических эпитиокаранов были проведены реакции α- и β-3,4-эпитиокаранов **1,6** с 2-меркаптоэтанолом. Реакционные условия включали использование этилата натрия в качестве основания и диметилсульфоксида (ДМСО) в качестве растворителя. В каждом случае реакции были проведены при комнатной температуре и закончились образованием двух индивидуальных продуктов, которые были успешно разделены и выделены в чистом виде с помощью колоночной хроматографии на силикагеле.

Экспериментальные данные выявили различия в соотношении продуктов в зависимости от типа тиоокиси: при использовании α-формы соотношение продуктов **7** и **8** составило 1:2, а в случае β-формы оказалось, что соотношение продуктов **4** и **5** составляет 2:1. Анализ динамики накопления показал, что аддукты **4** и **7** образуются на начальном этапе реакции, в то время как аддукты **5** и **8** накапливаются на последующих стадиях.



В процессе теоретического осмысления взаимодействия стереоизомерных эписульфидов с 2-меркаптоэтанолом необходимо учитывать его бифункциональную природу, поскольку данное соединение способно участвовать в реакциях посредством двух различных реакционных центров - меркаптогруппы или спиртового остатка. Данные элементного анализа соединений **4,7** указывают на то, что к каждой молекуле субстрата присоединяется одна молекула реагента. В ИК спектрах продуктов **4,7** присутствуют полосы характеристических колебаний сульфгидрильной (2560 см⁻¹), и гидроксильной (3410 см⁻¹ (ОН), групп, а также связи C-O (1040 см⁻¹), которые позволяют сделать вывод об атаке тиранового кольца сульфгидрильной группой 2-меркаптоэтанол.

Присутствие SH-группы в соединениях **4** и **7** было подтверждено данными ПМР-спектроскопии. Помимо сигналов, характерных для протонов идентичных для обоих соединений структурных фрагментов (циклопропанового кольца и метильных групп), в спектрах также присутствуют синглеты протонов меркапто-групп (2.20 м.д. (**4**) и 2.30 м.д. (**7**)) и гидроксильных групп (2.73 м.д. (**4**) и 2.76 м.д. (**7**)). Очевидно, S-хемоселективность присоединения 2-

меркаптоэтанола обусловлена более высокой нуклеофильной активностью атома серы по сравнению с атомом кислорода. Именно эта особенность определяет механизм реакции: образующийся из реагента тиолят-анион избирательно атакует тирановый цикл.

Регио- и стереохимические особенности раскрытия тиранового цикла эписульфидов **1,6**, наблюдаемые при взаимодействии с 2-меркаптоэтаноном, согласуются с данными, полученными ранее в ходе реакций с алкантиолами и тиофенолом. В этих реакциях, описанных нами ранее, были получены аддукты *транс*-присоединения с третичной меркаптогруппой.

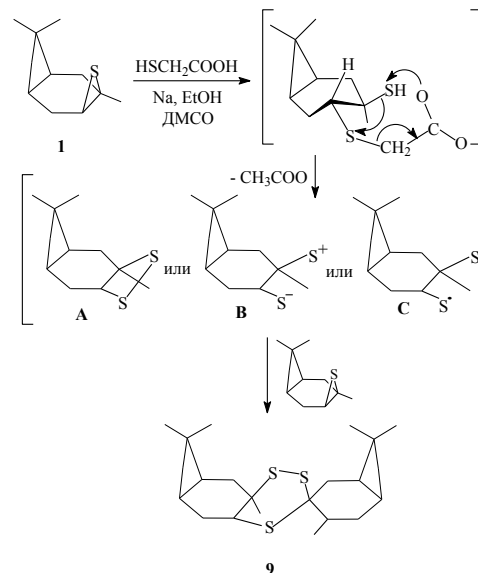
Анализ ИК-спектров соединений **5** и **8** демонстрирует интересную особенность: в них не обнаруживается пик характеристических колебаний SH группы, в то время как сигналы колебаний OH группы отчетливо присутствуют. Результаты элементного анализа продуктов **5** и **8** показали, что в ходе реакции происходит взаимодействие 1 моля тиоокиси с 2 молями серосодержащего реагента.

Есть основания полагать, что продукты **5** и **8** образуются из тиоокисей 3-карена в результате последовательного взаимодействия с двумя молями 2-меркаптоэтанола: на первой стадии реакции возникают промежуточные моноаддукты **4,7** со свободной SH группой, которые снова реагируют с 2-меркаптоэтаноном, образуя дисульфиды **5,8**. Интересно, что соединение **4** проявляет более высокую реакционную способность, что приводит к преимущественному образованию продукта **5**. Такое различие в реакционной способности объясняется особенностями молекулярного строения: меньшие стерические препятствия с α -стороны молекулы **4** приводят к более эффективному протеканию реакции. В случае соединения **7** процесс осложняется наличием стерических препятствий, затрудняющих подход реагента со стороны *гем*-диметилциклопропанового фрагмента, в результате чего дисульфид **8** образуется только в качестве минорного.

В ходе дальнейшего изучения реакционной способности стереоизомерных эпителиокаранов **1,6** при взаимодействии с тиогликолевой кислотой (60 ч., 90°C, этилат натрия, ДМСО) было установлено, что образование единственного продукта **9** наблюдается только в случае с β -тиоокисью 3-карена **1**.

Установление пространственного строения соединения **9** было выполнено методом рентгеноструктурного анализа [4]. В молекуле **9** обнаружена сложная конденсированная система из пяти взаимосвязанных циклов. Основу этой системы два фрагмента карановой фрагментами, соединенными через три структуры, соединенных посредством тритетанового цикла. Геометрические характеристики молекулы имеют следующие особенности: 1) Фрагменты C1C2C5C6 и C1'C2'C5'C6 располагаются

практически в одной плоскости; 2) двугранные углы между этими фрагментами составляют 27.1°; 3) циклопропановое кольцо образует с каждым из плоских фрагментов углы 65.3° и 66.6°; 4) тиетановый цикл находится в *твист*-конформации с двугранным углом 120.3° между плоскими фрагментами; 5) все объемные заместители (метильные группы при C3 и C3', а также сульфидный фрагмент) имеют экваториальное расположение.



Вероятнее всего, образование соединения **9** осуществляется по следующей схеме. На первом этапе реакции происходит *транс*-присоединение меркаптоуксусной кислоты к молекуле тиоокиси, после чего происходит отщепление ацетат-иона с образованием промежуточных частиц - либо циклического интермедиата **A**, возможность существования которого подтверждается литературными данными об 1,2-дитиетанах, либо цвиттер-иона **B**. Также нельзя исключить возможность существования иных промежуточных частиц бирадикальной структуры **C**. Этот интермедиат способен вступить во взаимодействие с дополнительной молекулой тиоокиси, приводя к образованию 4,4'-тио(дикаранил)-3,3'-дисульфида **9** [7].

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований нами было установлено, что реакция β -3,4-эпителиокарана с пренилмеркаптаном в основной среде завершается образованием двух соединений: помимо ранее описанного в реакциях с алкантиолами "нормального" аддукта *транс*-присоединения (терпентиола), также обнаружен продукт его окисления - дисульфид с двумя терпеновыми фрагментами.

Реакции α - и β -3,4-эпителиокаранов с 2-меркаптоэтаноном в щелочной среде в каждом случае приводят к образованию двух тиопроизводных карановой структуры - "нормального" продукта *транс*-присоединения 1

моля серосодержащего реагента (моно-аддукт с одним остатком 2-меркаптоэтанола и двумя атома серы), и бис-аддукта с двумя меркаптоэтанольными фрагментами и тремя атомами серы.

При взаимодействии α - и β -3,4-эпителиокаранов с меркаптоуксусной кислотой в аналогичных условиях только в случае β -тиоокиси 3-карена было зафиксировано образование кристаллического соединения тиетановой структуры. Уникальная гетероциклическая система данного соединения заключается в том, что в его структуре два карановых фрагмента связаны посредством трех атомов серы.

Благодарности

Работа выполнена на средства гранта Фонда науки и технологий Республики Татарстан (2025 г.), целью которого является поддержка фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Литература

1. В.А. Старцева, Л.Е. Никитина, И.В. Федюнина, И.Р. Гильфанов, О.Т. Шипина, Ф.С. Шарифуллин, Р.Ф. Ахвердиев, А.В. Герасимов, Е.А. Сарбазян, А.В.

Толмачева, А.Ю. Шарифуллина // Вестник ТУ. – 2025. – Т.28. – №10. – С. 5-9.
2. W. Cocker // Tetrahedron Lett. – 1969. – V.51. – P. 4451-4452.
3. W.L.F. Armarego, C.L.L. Chai, *Purification of laboratory chemicals, 6th ed.*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2009, 760 p.
4. И.В. Федюнина, Л.Е. Никитина, В.В. Племенков // Хим. прир. соед. – 1995. – №4. – С. 576-580.
5. И.В. Федюнина, Л.Е. Никитина, В.В. Племенков // Хим. прир. соед. – 1992. – №5. – С. 497-499.
6. И.В. Федюнина, Л.Е. Никитина, В.В. Племенков // Хим. прир. соед. – 1993. – №5. – С. 677-684.
7. S. Kosta // Acc.Chem. Res. – 1991. – Vol.24. – №11. – P. 341-350.

References

1. V.A. Startseva, L.E. Nikitina, I.V. Fedyunina, I.R. Gilfanov, O.T. Shipina, F.S. Sharifullin, R.F. Akhverdiev, A.V. Gerasimov, E.A. Sarbazyan, A.V. Tolmacheva, A.Yu. Sharifullina // Bulletin of TU. – 2025. – Vol. 28. – No. 10. – pp. 5–9.
2. W. Cocker // Tetrahedron Lett. – 1969. – Vol. 51. – pp. 4451–4452.
3. W.L.F. Armarego, C.L.L. Chai, *Purification of laboratory chemicals, 6th ed.*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2009, 760 p.
4. I.V. Fedyunina, L.E. Nikitina, V.V. Plemkov // Chem. Nat. Comp. – 1995. – No. 4. – pp. 576–580.
5. I.V. Fedyunina, L.E. Nikitina, V.V. Plemkov // Chem. Nat. Comp. – 1992. – No. 5. – pp. 497–499.
6. I.V. Fedyunina, L.E. Nikitina, V.V. Plemkov // Chem. Nat. Comp. – 1993. – No. 5. – pp. 677–684.
7. S. Kosta // Acc. Chem. Res. – 1991. – Vol. 24. – No. 11. – pp. 341–350.

© **В. А. Старцева** - доцент, кафедра Общей и органической химии (ООХ), Казанский государственный медицинский университет (КГМУ), Казань, Россия, valestar@mail.ru; **И. В. Федюнина** - доцент, кафедра ООХ, КГМУ, inovit@mail.ru; **Л. Е. Никитина** - профессор, заведующая кафедрой ООХ, КГМУ, nikitl@mail.ru; **Л. Ю. Беляева** – старший лаборант, кафедра ООХ, КГМУ, LarisaBelliaeva@yandex.ru; **И. Р. Гильфанов** - ассистент, кафедра ООХ, КГМУ, ilmir.gilfanov@gmail.com; **А. С. Симакова** – студент, Медико-биологический факультет, КГМУ, simka.nas2005@gmail.com; **О. Т. Шипина** - профессор, кафедра Химии и технологии высокомолекулярных соединений, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, shipina.olga@yandex.ru; **Р. Ф. Ахвердиев** — доцент, кафедра Высшей математики, кафедра Материалов и технологий легкой промышленности, КНИТУ, rust123@rambler.ru; **Е. А. Сарбазян** – аспирант, КНИТУ, sarbazyan@mail.ru; **Д. М. Пастеляк** - аспирант, КНИТУ, daniil.pastelyak@gmail.com.

© **V. A. Startseva** - Associate Professor, Department of General and Organic Chemistry (GOC), Kazan State Medical University (KSMU), Kazan, Russia, valestar@mail.ru; **I. V. Fedyunina** - Associate Professor, the GOC department, KSMU, inovit@mail.ru; **L. E. Nikitina** - Professor, Head of the GOC department, KSMU, nikitl@mail.ru; **L. Yu. Belyaeva** – Senior Laboratory Engineer, the GOC department, KSMU, LarisaBelliaeva@yandex.ru; **I. R. Gilfanov** – Assistant, the GOC department, KSMU, ilmir.gilfanov@gmail.com; **A. S. Simakova** – Student, Faculty of Medicine and Biology, KSMU, simka.nas2005@gmail.com; **O. T. Shipina** – Professor, Department of Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, shipina.olga@yandex.ru; **R. F. Akhverdiev** — Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Department of Materials and Technologies of Light Industry, KNRTU, rust123@rambler.ru; **E.A. Sarbazyan** – PhD-student, KNRTU, sarbazyan@mail.ru; **D. M. Pastelyak** – PhD-student, KNRTU, daniil.pastelyak@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.04.26.

Дата принятия рукописи в печать – 06.05.26.