

Э. Г. Мамедбейли (д.х.н., проф.) ¹, Е. А. Удалова (д.т.н., проф.) ², Г. Э. Гаджиева (к.х.н., доц.) ¹,
И. Г. Аюбов (д.х.н., доц.) ¹, С. В. Исмайлова (докторант) ¹, Г. З. Гейдарли (докторант) ¹

СЕСКВИТЕРПЕНЫ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

¹ Институт нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева
Министерства науки и образования Азербайджана,
лаборатория «Исследование антимикробных свойств и биоповреждений»
Республика Азербайджан, AZ 1025, г. Баку, пр. Ходжалы, 30; e-mail: gulsum.mete@mail.ru

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра физической и органической химии
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: vakil2004@mail.ru

E. H. Mammadbayli ¹, E. A. Udalova ², G. A. Hajiyeva ¹,
I. H. Ayyubov ¹, S. V. Ismayilova ¹, G. Z. Heydarli ¹

SESQUITERPENE: SYNTHESIS, PROPERTIES AND AREAS OF APPLICATION

¹ Y. H. Mamedaliyev's Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education
30, Khojaly ave. 30, AZ1025, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: gulsum.mete@mail.ru

² Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: vakil2004@mail.ru

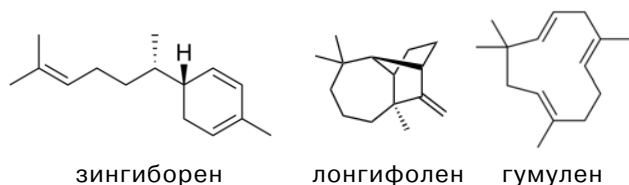
Сесквитерпены являются весьма интересным и важным классом органических соединений, находящихся широкое практическое применение. В обзоре нами рассмотрены представители этой группы терпеноидов, содержащие ациклические (линейные), моноциклические, бициклические или трициклические структуры, показаны основные методы получения этих соединений, описаны их физико-химические свойства, а также отмечены основные направления их применения. Показано, что сесквитерпены могут встречаться в виде углеводородов или содержать кислородную функциональность, включая карбоновые кислоты, лактоны, спирты, альдегиды, кетоны и эпоксиды. Расширение цепи с увеличением в ряде циклизаций, а также биохимические модификации (перегруппировка или окисление) позволяют получить большое разнообразие структур из сесквитерпенов. Рассмотрена активность сесквитерпенов в качестве феромонов и ювенильных гормонов, проанализирована их биологическая активность.

Ключевые слова: антибактериальные компоненты; гумулен; зингиборен; изоперноиды; лонгифолен; сесквитерпены

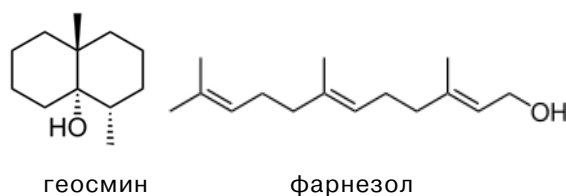
Sesquiterpenes are a very interesting and important class of organic compounds that find wide practical application. In this review, we consider representatives of this group of terpenoids containing acyclic (linear), monocyclic, bicyclic or tricyclic structures, show the main methods for obtaining these compounds, describe their physicochemical properties, and also note the main areas of their application. It is shown that sesquiterpenes can occur in the form of hydrocarbons or contain oxygen functionality, including carboxylic acids, lactones, alcohols, aldehydes, ketones and epoxides. Chain expansion with an increase in a number of cyclizations, as well as biochemical modifications (rearrangement or oxidation) make it possible to obtain a wide variety of structures from sesquiterpenes. The activity of sesquiterpenes as pheromones and juvenile hormones is considered, their biological activity is analyzed.

Key words: antibacterial components; humulene; isoprenoids; longifolene; sesquiterpenes; zingiborene

Сесквитерпены представляют собой класс терпенов, которые состоят из трех изопреновых единиц. Как и монотерпены, сесквитерпены могут быть циклическими или содержать кольца, включая множество комбинаций. Биохимические модификации, такие как окисление или перегруппировка, производят родственные сесквитерпеноиды. В настоящее время идентифицировано более 3000 сесквитерпенов. Наиболее основные представители сесквитерпенов:



Основная цепь сесквитерпенов может быть перестроена несколькими различными способами и дополнительно насыщена различными функциональными группами, например:



Сесквитерпены – это вторичные метаболиты, которые обладают противовоспалительными, гастропротекторными и противораковыми свойствами ¹.

Соединения 11,12,13-три-нор-сесквитерпены являются деградированными сесквитерпеноидами, которые «потеряли» единицу С-3 изопренила или изопренила в С-7 скелета сесквитерпена ². Нерегулярный С-остов возникает из-за окислительного удаления боковой цепи С3 из сесквитерпена С15, который возникает из фарнезилдифосфата (FDP). С12-каркас образуется, как правило, во всех семействах сесквитерпенов путем окислительного расщепления заместителя С3 с одновременным введением двойной связи. В работе ² рассматривается выделение, биосинтез и биологическая активность этого особого класса сесквитерпенов.

Сесквитерпеноиды, и в частности сесквитерпеновые лактоны из *Asteraceae*, могут играть весьма значительную роль в укреплении здоровья человека – как в составе препаратов для сбалансированной диеты, так и в качестве фармацевтических средств для лечения сердечно-сосудистых заболеваний и рака. В работе ³ подчеркивается роль сесквитерпеновых лактонов эндогенно в растениях, которые их производят, и изучаются механизмы, посредством которых они взаимодействуют у жи-

вотных и людей, употребляющих эти растения. Предлагается несколько механизмов для снижения воспаления и образования опухолей на потенциально достижимых уровнях у людей. Растения можно классифицировать по их специфическому набору производимых сесквитерпеновых лактонов, демонстрирующих высокие уровни трансляционного контроля. Исследования народной медицины предполагают, что сесквитерпеновые лактоны являются активным ингредиентом во многих методах лечения других заболеваний, таких как диарея, ожоги, грипп и нейродеградация. В дополнение к противовоспалительной реакции было обнаружено, что сесквитерпеновые лактоны повышают чувствительность опухолевых клеток к традиционным лекарственным препаратам. В этом обзоре рассматриваются различные экологические роли сесквитерпенов в растении-продукте в зависимости от растения и соединения. К ним относятся аллелопатия с другими растениями, насекомыми и микробами, тем самым вызывающая поведенческую или эволюционную модификацию этих вторичных организмов в пользу производителя сесквитерпеноидов. Некоторые сесквитерпеноидные лактоны являются антимикробными, разрушая клеточную стенку грибов и инвазивных бактерий, тогда как другие защищают растение от экологических стрессов, которые в противном случае могли бы вызвать окислительное повреждение. Обсуждаются последствия качеств сесквитерпеноидных лактонов для будущего производства сельскохозяйственных культур.

Целью работы ⁴ стал анализ терапевтического потенциала сесквитерпенов эфирных масел с противовоспалительной активностью. Рассмотренные данные дают основу для поиска новых противовоспалительных препаратов из натуральных продуктов, которые не проявляют нежелательных побочных эффектов, часто проявляемых противовоспалительными препаратами. Представлены экспериментальные модели, возможные механизмы действия и химические структуры 12 сесквитерпенов.

Моно- и сесквитерпены являются летучими органическими соединениями, которые играют решающую роль в восприятии человеком вкуса и аромата столового винограда и вина, и их биосинтез вызывает интерес. В работе ⁵ рассматривается биосинтез моно- и сесквитерпенов в виноградной лозе с особым акцентом на метаболических путях, которые приводят к образованию этих соединений, и охарактеризованной генетической изменчивости, лежащей в основе модуляции этого метаболизма. Предполагается, что узкими местами для образования предшественников терпенов в цитозоле и пластиде являются ферменты HMG-

CoA-редуктаза (HMGR) и 1-дезоксид-ксилилозо-5-фосфатсинтаза (DXS) соответственно, и приводят к образованию предшественников пренилдифосфата. Функциональная пластичность ферментов терпенсинтазы, которые действуют на предшественников пренилдифосфата, допускает огромные вариации в наблюдаемом накоплении терпеновых продуктов. Это разнообразие еще больше усиливается в виноградной лозе за счет значительной дупликации генов, кодирующих структурно разнообразные терпенсинтазы. Незначительные нуклеотидные вариации могут повлиять как на продукт, так и на субстратную специфичность генов терпенсинтазы, причем эти вариации влияют на ароматические профили, специфичные для сорта. Хотя важность этих соединений с точки зрения качества винограда хорошо документирована, они также играют несколько интересных ролей в экофизиологическом взаимодействии виноградной лозы с окружающей средой. Моно- и сесквитерпены участвуют в привлечении опылителей, агентов распространения семян и травоядных, защите от грибковой инфекции, содействии взаимодействию мутуалистических ризобактерий, их активность возрастает в условиях высокой световой радиации. Постоянно растущие данные о последовательности генома виноградной лозы потенциально позволяют будущим селекционерам и биотехнологам адаптировать ароматические профили новых сортов виноградной лозы путем использования значительной генетической изменчивости, наблюдаемой в генах терпенсинтазы.

В работе ⁶ рассмотрен биосинтез сесквитерпенов. Биогенные пары образуют новые частицы в атмосфере, влияя на глобальный климат. Вклад монотерпенов и изопрена в образование новых частиц (NPF) был тщательно изучен. Однако сесквитерпенам уделялось мало внимания, несмотря на потенциально важную роль из-за их высокой молекулярной массы. С помощью экспериментов в камере, проведенных в атмосферных условиях, были получены биогенные NPF в результате окисления чистых смесей β -кариофиллена, α -пинена и изопрена, которые производят кислородсодержащие соединения в широком диапазоне летучести ⁷. Авторы обнаружили, что органические соединения со сверхнизкой летучестью (ULVOC) являются высокоэффективными нуклеаторами и количественно определяют эффективность NPF. По сравнению со смесью изопрена и монотерпена по отдельности, добавление всего 2% сесквитерпена увеличивает выход ULVOC и удваивает скорость образования. Таким образом, выбросы сесквитерпенов необходимо включать в оценки глобальных концентраций аэрозолей в нетронутых климатах, где биогенные НПФ, как ожидается, являются основным источ-

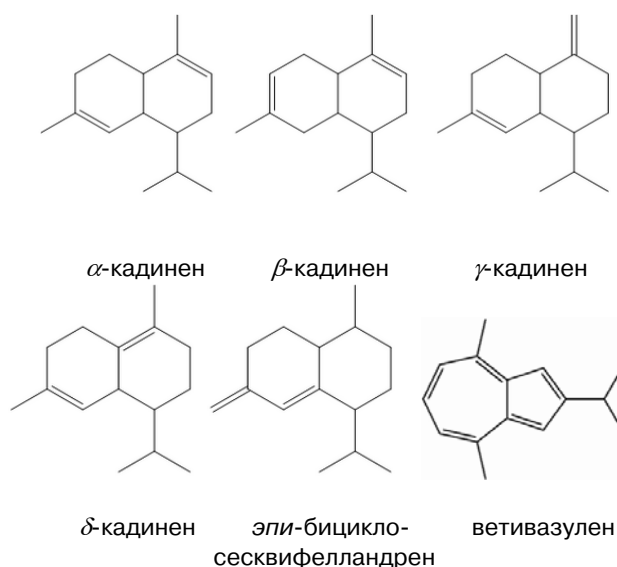
ником ядер конденсации облаков. Аналогичные исследования проведены в работе ⁸.

Авторы работы ⁹ проанализировали распространение, структуру, биологическую активность, биосинтез и синтез сесквитерпеновых алкалоидов. По их классификации сесквитерпены можно разделить на группы:

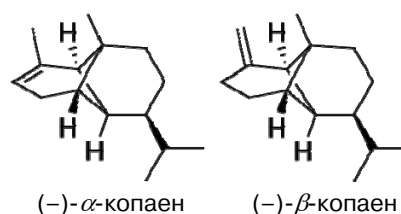
А – ациклические (фарнезол)

Б – моноциклические (зингиборен, гумулен)

В – бициклические



Г – трициклические



Сесквитерпены – это летучие соединения, вырабатываемые растениями, насекомыми и морскими организмами ¹⁰. Они обладают широким спектром биологических свойств и являются мощными ингибиторами и модуляторами воспаления, воздействуя на определенные компоненты сигнального пути ядерного фактора каппа В (NF- κ B) и генерацию оксида азота NO. Поскольку сесквитерпены могут быть выделены из более чем 1600 родов и 2500 видов растений, они являются привлекательным источником фитохимических терапевтических средств. Строение этих соединений характеризуется структурным разнообразием, их каркас может включать как ациклические, так и циклические (моно-, би-, три- и тетрациклические) фрагменты. Эти структуры могут быть декорированы разнообразным набором функциональных групп и заместителей, создавая множество

стереоспецифических конфигураций. В работе ¹⁰ обсуждается влияние сексвитерпенов на воспаление в контексте их сложной химии. Поскольку воспаление является многофакторным процессом, авторы фокусируются на конкретных аспектах воспаления: ингибировании сигнализации NF- κ B, нарушении продукции NO и модуляции дендритных клеток, тучных клеток и моноцитов.

Laurencia – важный род морских красных водорослей, включающий около 130 таксономически принятых видов ¹¹. Соединения, выделенные из видов *Laurencia*, проявляют разнообразную биологическую активность: противовирусную, антибактериальную, противообрастающую, противогрибковую, антиоксидантную, антифидантную, противомаларийную, противогельминтную, противоастматическую и цитотоксическую активность. Сесквитерпеноиды с различными классами и функциональностями являются основными составляющими этого рода. Все сесквитерпеновые соединения, зарегистрированные в этом роде в течение указанного периода, классифицированы в соответствии с их химическим классом и общим структурным типом. Более 200 сесквитерпенов, выделенных из красных водорослей *Laurencia*, обсуждаются с точки зрения их структурного типа, распространенности и зарегистрированной фармакологической активности. Исследования в области изучения структуры сесквитерпенов также обсуждались в работах ^{12–15}.

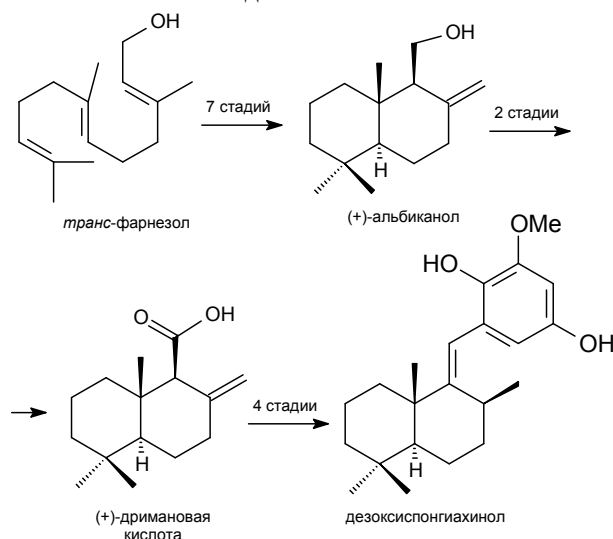
В научной литературе имеются многочисленные сообщения по синтезу некоторых сексвитерпенов. Так, в работе ¹⁶ продемонстрирован первый полный синтез (–)-мерриллина, который является природным сесквитерпеном с трициклической структурой, имеющей цикlopentanовое кольцо и пяти- и семичленные лактонные части. Этот асимметричный полный синтез позволил определить абсолютную стереоструктуру природного (–)-мерриллина.

Сесквитерпеновые трополоны принадлежат к отличительному структурному классу меротерпеновых натуральных продуктов с впечатляющей биологической активностью, включая противораковую, противогрибковую, противомаларийную и антибактериальную ¹⁷. В этой работе представлен краткий модульный и основанный на циклоприсоединении подход к серии сесквитерпеновых моно- и бистрополонов, включая (–)-эполон В, (+)-изоэполон В, (±)-дегидроксипикнидион и (–)-10-эпи-пикнидион. Наряду с разработкой общей стратегии доступа к этому уникальному семейству метаболитов проводились исследования с использованием вычислительного моделирования, которые обосновывали диастереоселективность, наблюдаемую во время ключевых циклоп-

рисоединений. В конечном итоге эти исследования подтолкнули к стереохимическим переименованиям подкласса пикнидионов и пролили дополнительный свет на биосинтез этих натуральных продуктов.

В обзорной статье ¹⁸ основное внимание уделяется научным разработкам, касающимся ферментативно-опосредованного синтеза сесквитерпенов, которые были описаны в академической и патентной литературе за последние двадцать лет. Тем не менее, это не всеобъемлющее описание каждой отдельной биотрансформации с участием сесквитерпенов. Сообщается только о синтетических подходах, которые представляют собой новую и инновационную перспективу с научной точки зрения. Подробно описывается, как использование метаболической инженерии микробных биотрансформаций и изолированных ферментов было использовано для выполнения хемо- и стереоселективных химических преобразований, представляющих интерес для синтеза сесквитерпенов.

Каскад радикальной циклизации с участием Ti (III) был использован для синтеза сесквитерпенов (+)-альбиканола, (+)-дриманола и (+)-дримановой кислоты ¹⁹. Начиная с *транс*-фарнезола, (+)-альбиканол можно было получить за семь этапов с общим выходом 14.9%. Кроме того, была разработана высокодистереоселективная гидрогенизация (+)-альбиканола с получением (+)-дриманола. Авторы использовали синтезированную (+)-дримановую кислоту для достижения первого синтеза морского сесквитерпена гидрохинона дезоксиспонгиахинола и хинона дезоксиспонгиахинона:

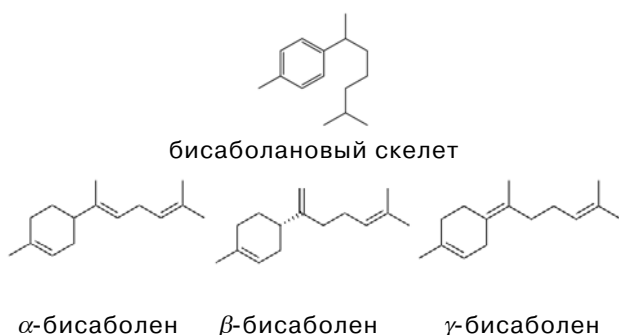


Такая синтетическая стратегия позволила получить пять натуральных продуктов.

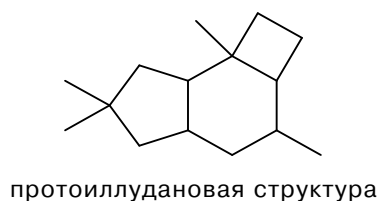
Описаны детали первых полных синтезов сесквитерпенов милтайл-8(12)-ена и 6-эпиюницедрана-8-ола ²⁰. Альдегид, полученный пере-

группировкой Кляйзена циклогераниола, был преобразован в диеноны. Циклизация и перегруппировка, опосредованная трифторидом бора и диэтиловым эфиром, преобразовали диеноны в трициклические кетоны, эффективно создавая три и четыре смежных четвертичных атома углерода соответственно. Метиленирование Виттига дало ($\pm$)-милтайл-8(12)-ен, тогда как восстановление кетона дало ($\pm$)-6-эпиюницедранол.

Полный синтез трех членов семейства сесквитерпенов бисаболана, а именно ($\pm$)-куркумена, ($\pm$)-ксанторизола и ($\pm$)-куркугидрохинона, был достигнут с высоким общим выходом²¹. В качестве исходных материалов в синтезе были использованы производные бромбензола. Галоген-литиевый обмен с последующим добавлением изопренилацетона и восстановление полученных карбинолов стали ключевыми этапами синтетического пути. Этот синтетический подход обеспечивает новый путь к сесквитерпенам бисаболана.



Отмечается²², что натуральные продукты продолжают привлекать внимание и интерес широкого химического сообщества. Это связано с их биологическими свойствами и потенциальной применимостью в здравоохранении и защите растений, а также с их часто сложной молекулярной архитектурой и набором функциональных возможностей, что делает их вызовом для полного синтеза и испытательным полигоном для новой методологии. Этим критериям в исключительной степени отвечают протоиллуданы, которые являются сесквитерпенами с характерной трициклической 5/6/4-структурой:

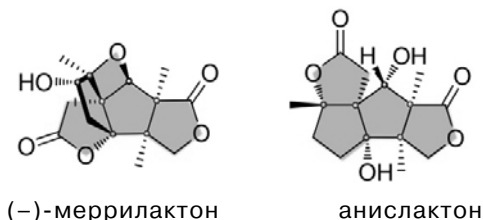


Обсуждаются биосинтез, биологические свойства и необычайно богатое разнообразие синтетических подходов, разработанных за последние сорок лет. В этом обзоре перечислено около

80 различных моделей замещения и 15 завершенных или незавершенных синтетических маршрутов с целью предоставления многогранной картины изменений и развития синтетической философии и методологии от прошлого к настоящему.

Сесквитерпены – важный класс молекул, функции которых очень многообразны²³. Несмотря на их очевидную важность, ограниченное количество коммерческих стандартов затрудняет их изучение и точную количественную оценку. В данной работе авторы сообщают о синтезе четырнадцати меченых сесквитерпенов с высоким уровнем включения дейтерия (>95%) для применения в исследованиях на основе МС.

Сесквитерпеноиды (–)-меррилактоны и анислактоны, содержат [5-5] бициклический карбоциклический скелет, две структурные единицы γ -бутиролактона, характеризующиеся перегруженными стереоцентрами и высоким уровнем окисления²⁴. Этот тип природных продуктов демонстрирует мощную нейротрофическую активность. В частности, (–)-меррилактон проявляет превосходную нейротрофическую активность даже при более низкой концентрации с потенциалом для лечения нейрозаболеваний, таких как болезнь Альцгеймера. Благодаря их сложным клеточным структурам и превосходным биологическим профилям синтез сесквитерпеноидов типа анислактона привлек значительное внимание синтетических сообществ:



В работе²⁴ суммируются последние достижения в синтезе этого типа сесквитерпеноидов.

Сесквитерпены дримана, включая дрименин циннамолд и полигодиал в рацемической и в оптически активной форме были синтезированы из β -иона с внутримолекулярной реакцией Дильса-Альдера в качестве ключевого этапа²⁵.

Синтез, свойства и области применения сесквитерпенов также стали предметом обсуждения в работах^{26–30}.

На протяжении нескольких последних лет в нашей лаборатории проводятся исследования по изучению терпенов и их применению в различных химических процессах^{31,32}, в частности, в реакциях диенового синтеза и аминотетирования. В качестве исходных реагентов были использованы такие терпеновые углеводороды, как камфора, борнеол и др.

Литература

1. Duran A.G., Rial C., Gutierrez M.T., Molinillo J.M. Handbook of Dietary Phytochemicals.– Singapore: Springer, 2019.– Pp.477–542.
2. Coca-Ruiz V., Suarez I., Aleu J., Collado I. Structures, Occurrences and Biosynthesis of 11,12,13-Tri-nor-Sesquiterpenes, an Intriguing Class of Bioactive Metabolites // *Plants*.– 2022.– V.11, №6.– Pp.769-776.
3. Chadwick M., Trewin H., Gawthrop F., Waqstaff C. Sesquiterpenoids Lactones: Benefits to Plants and People // *Inter. J. Mol. Sci.*– 2013.– V.14, №6.– Pp.12780-12805.
4. Slveira R.C., Andrade L.N., Sousa D.P. Sesquiterpenes from Essential Oils and Anti-Inflammatory Activity // *Natural Product Communications*.– 2015.– V.10, №10.– Pp.1767-1774.
5. Bosman R., Lashbrooke J.G. Grapevine mono- and sesquiterpenes: Genetics, metabolism, and ecophysiology // *Front. Plant. Sci.*– 2023.– V.14.– Pp.234-239.
6. Cordell G.A. Biosynthesis of sesquiterpenes // *Chem. Rev.*– 1976.– V.76, №4.– Pp.425-460.
7. Dada L., Stolzenburg D., Simon M., Fischer L. Role of sesquiterpenes in biogenic new particle formation // *Science Advances*.– 2023.– V.9, №36.– Pp.26-37.
8. Yee L., Isaacman-VanWertz G., Wernis R., Meng M. Observations of sesquiterpenes and their oxidation products in central Amazonia during the wet and dry seasons // *Atmospheric Chemistry and Physics*.– 2018.– V.18, №14.– Pp.10433-10457.
9. Brocksom T., Oliveira K., Desidera A. The Chemistry of the Sesquiterpene Alkaloids // *J. Braz. Chem. Soc.*– 2017.– V.28, №6.– Pp.312-317.
10. Arizmendi N., Alam S., Azyat Kh., Makeiff D. The Complexity of Sesquiterpene Chemistry Dictates Its Pleiotropic Biologic Effects on Inflammation // *Molecules*.– 2022.– V.27, №8.– Pp.2450-2458.
11. Al-Massarani Sh. Phytochemical and Biological Properties of Sesquiterpene Constituents From the Marine Red Seaweed *Laurencia* // *Natural Product Chemistry and Research*.– 2014.– V.2, №5.– Pp.147-159.
12. Sarboland S., Mehrkhou F., Fattahi M., Forouzan M. Biocontrol potential of aqueous and methanolic extracts of *Russian knapweed*, *Acroptilon repens*, L. (*Asteraceae*) against *Trialeurodes vaporariorum* (*Hemiptera: Aleyrodidae*) // *Scientific Reports*.– 2025.– V.15.– Pp.14928-14927.
13. Et-tazy L., Lamiri A., Bencheqroum S.K., Errati H. Exploring synergistic insecticidal effects of binary mixtures of major compounds from six essential oils against *Callosobruchus maculatus* // *Scientific Reports*.– 2025.– V.15.– Pp.15180-15189.
14. Abugu M., Allan M., Johanningsmeier S., Jorizzo M. Comprehensive review of sweetpotato flavor compounds: Opportunities for developing consumer-preferred varieties // *Comprehensive Review*.– 2025.– V.24, №3.– Pp.70172-70177.
15. Bouvier-Brown N.C., Goldstein A.H., Gilman J.B., Kuster W.C. *In-situ* ambient quantification of monoterpenes, sesquiterpenes, and related oxygenated compounds during BEARPEX 2007: implications for gas- and particle-phase chemistry // *Atmospheric Chemistry and Physics*.– 2009.– V.9, №15.– Pp.5505-5558.
16. Shiina I., Lizumi T., Taniguchi S., Masuhiro S. Total Synthesis of the Sesquiterpene (–)-Merrillianin // *Org. Lett.*– 2024.– V.26, №16.– Pp.3327-3331.

References

1. Duran A.G., Rial C., Gutierrez M.T., Molinillo J.M. [Handbook of Dietary Phytochemicals]. Singapore, Springer Publ., 2019, pp.477–542.
2. Coca-Ruiz V., Suarez I., Aleu J., Collado I. [Structures, Occurrences and Biosynthesis of 11,12,13-Tri-nor-Sesquiterpenes, an Intriguing Class of Bioactive Metabolites]. *Plants*, 2022, vol.11, no.6, pp.769-776.
3. Chadwick M., Trewin H., Gawthrop F., Waqstaff C. [Sesquiterpenoids Lactones: Benefits to Plants and People]. *Inter. J. Mol. Sci.*, 2013, vol.14, no.6, pp.12780-12805.
4. Slveira R.C., Andrade L.N., Sousa D.P. [Sesquiterpenes from Essential Oils and Anti-Inflammatory Activity]. *Natural Product Communications*, 2015, vol.10, no.10, pp.1767-1774.
5. Bosman R., Lashbrooke J.G. [Grapevine mono- and sesquiterpenes: Genetics, metabolism, and ecophysiology]. *Front. Plant. Sci.*, 2023, vol.14, pp.234-239.
6. Cordell G.A. [Biosynthesis of sesquiterpenes]. *Chem. Rev.*, 1976, vol.76, no.4, pp.425-460.
7. Dada L., Stolzenburg D., Simon M., Fischer L. [Role of sesquiterpenes in biogenic new particle formation]. *Science Advances*, 2023, vol.9, no.36, pp.26-37.
8. Yee L., Isaacman-VanWertz G., Wernis R., Meng M. [Observations of sesquiterpenes and their oxidation products in central Amazonia during the wet and dry seasons]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol.18, no.14, pp.10433-10457.
9. Brocksom T., Oliveira K., Desidera A. [The Chemistry of the Sesquiterpene Alkaloids]. *J. Braz. Chem. Soc.*, 2017, vol.28, no.6, pp.312-317.
10. Arizmendi N., Alam S., Azyat Kh., Makeiff D. [The Complexity of Sesquiterpene Chemistry Dictates Its Pleiotropic Biologic Effects on Inflammation]. *Molecules*, 2022, vol.27, no.8, pp.2450-2458.
11. Al-Massarani Sh. [Phytochemical and Biological Properties of Sesquiterpene Constituents From the Marine Red Seaweed *Laurencia*]. *Natural Product Chemistry and Research*, 2014, vol.2, no.5, pp.147-159.
12. Sarboland S., Mehrkhou F., Fattahi M., Forouzan M. [Biocontrol potential of aqueous and methanolic extracts of *Russian knapweed*, *Acroptilon repens*, L. (*Asteraceae*) against *Trialeurodes vaporariorum* (*Hemiptera: Aleyrodidae*)]. *Scientific Reports*, 2025, vol.15, pp.14928-14927.
13. Et-tazy L., Lamiri A., Bencheqroum S.K., Errati H. [Exploring synergistic insecticidal effects of binary mixtures of major compounds from six essential oils against *Callosobruchus maculatus*]. *Scientific Reports*, 2025, vol.15, pp.15180-15189.
14. Abugu M., Allan M., Johanningsmeier S., Jorizzo M. [Comprehensive review of sweetpotato flavor compounds: Opportunities for developing consumer-preferred varieties]. *Comprehensive Review*, 2025, vol.24, no.3, pp.70172-70177.
15. Bouvier-Brown N.C., Goldstein A.H., Gilman J.B., Kuster W.C. [*In-situ* ambient quantification of monoterpenes, sesquiterpenes, and related oxygenated compounds during BEARPEX 2007: implications for gas- and particle-phase chemistry]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, vol.9, no.15, pp.5505-5558.
16. Shiina I., Lizumi T., Taniguchi S., Masuhiro S. [Total Synthesis of the Sesquiterpene (–)-Merrillianin]. *Org. Lett.*, 2024, vol.26, no.16, pp.3327-3331.

17. Bernis Ch., Unqarean Ch., Shved A.S., Jamieson C.S. Total Synthesis and Computational Investigations of Sesquiterpene-Tropolones Ameliorate Stereochemical Inconsistencies and Resolve an Ambiguous Biosynthetic Relationship // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2021. – V.143, №15. – Pp.6006-6017.
18. Serra S. Enzyme-Mediated Synthesis of Sesquiterpenes // *Natural Product Communications*. – 2015. – V.10, №1. – Pp.157-166.
19. Gohl M., Seifert K. Synthesis of the Sesquiterpenes Albicanol, Drimanol, and Drimanic Acid, and the Marine Sesquiterpene Hydroquinone Deoxyspongiaquinol // *European Journal of Organic Chemistry*. – 2014. – V.31, №2. – Pp.6975-6982.
20. Srikrishna A., Yelamaqqad C.V., Praveen K.P. Rearrangement approaches to sesquiterpenes containing multiple contiguous quaternary carbon atoms. Total synthesis of (±)-myltayl-8(12)-ene and (±)-6-epijunicedranol // *Journal of the Chemical Society. Perkin Trans. 1*. – 1999. – V.20, №2. – Pp.2877-2881.
21. Zhen-Ting D., Zheng Sh., Chen G., Dong L. A Short Synthesis of Bisabolane Sesquiterpenes // *Molecules*. – 2011. – V.16, №9. – Pp.8053-8061.
22. Siengalewicz P., Mulzer J., Rinner U. Synthesis of Protoilludanes and Related Sesquiterpenes // *European Journal of Organic Chemistry*. – 2011. – V.35, №2. – Pp.7041-7055.
23. Duhamel N., Martin D., Larcher R., Fedrizzi B., Barker D. Convenient synthesis of deuterium labelled sesquiterpenes // *Tetrahedron Lett.* – 2016. – V.57, №40. – Pp.4496-4499.
24. Jian L., Long H., Zhiqiang Zh., Yanxia Zh. Advances in the Synthesis of Anislactone-Type Sesquiterpenes // *Chinese Journal of Organic Chemistry*. – 2020. – V.40, №10. – Pp.3166-3176.
25. Ju-Fang H., Yu-Lin W. Synthesis of drimane sesquiterpenes an intramolecular Diels-Alder approach // *Tetrahedron*. – 1988. – V.44, №7. – Pp.1933-1940.
26. Tong Y., Ping S., Guan H., Chen J. Eudesmane-type sesquiterpene diols directly synthesized by a sesquiterpene cyclase in *Tripterygium wilfordii* // *Biochemical Journal*. – 2018. – V.475, №17. – Pp.2713-2725.
27. Pirrung M., Morehead A., Goldsmith D. The Total Synthesis of Natural Products: Acyclic and Monocyclic Sesquiterpenes. – Wiley-Interscience, 1997. – 192 p.
28. Zhang C., Rinkel J., Goldfuss B., Dickschat J. Sesquiterpene cyclizations catalysed inside the resorcinarene capsule and application in the short synthesis of isolongifolene and isolongifolenone // *Nature Catalysis*. – 2018. – V.1. – Pp.609-615.
29. Blay G., Collado A.M., Pedro J. Synthesis of Sesquiterpenes via Silicon-Guided Rearrangement of Epoxydecalins // *Natural Product Communications*, 2019, vol.15, pp.312-317.
30. Yates P., Grewal R., Hayes P., Sawyer J. Synthesis of cedranoid sesquiterpenes. vol. The biotols // *Canadian Journal of Chemistry*, 1988, vol.66, no.11, pp.447-451.
31. Аюбов И.Г., Гажиева Г.Э. Реакция Дильса-Альдера в синтезе терпенов и их производных // *Баш. хим. ж.* – 2022. – Т.29, №3. – С.5-10.
32. Мамедбейли Э.Г., Удалова Е.А., Гаджиева Г.Э., Аюбов И.Г., Исмаилова С.В. Синтез, свойства и области применения монотерпенов и их производных // *Баш. хим. ж.* – 2025. – Т.32, №1. – С.25-33.
17. Bernis Ch., Unqarean Ch., Shved A.S., Jamieson C.S. [Total Synthesis and Computational Investigations of Sesquiterpene-Tropolones Ameliorate Stereochemical Inconsistencies and Resolve an Ambiguous Biosynthetic Relationship]. *J. Amer. Chem. Soc.*, 2021, vol.143, no.15, pp.6006-6017.
18. Serra S. [Enzyme-Mediated Synthesis of Sesquiterpenes]. *Natural Product Communications*, 2015, vol.10, no.1. – pp.157-166.
19. Gohl M., Seifert K. [Synthesis of the Sesquiterpenes Albicanol, Drimanol, and Drimanic Acid, and the Marine Sesquiterpene Hydroquinone Deoxyspongiaquinol]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2014, vol.31, no.2, pp.6975-6982.
20. Srikrishna A., Yelamaqqad C.vol., Praveen K.P. [Rearrangement approaches to sesquiterpenes containing multiple contiguous quaternary carbon atoms. Total synthesis of (±)-myltayl-8(12)-ene and (±)-6-epijunicedranol]. *Journal of the Chemical Society. Perkin Trans. 1*, 1999, vol.20, no.2, pp.2877-2881.
21. Zhen-Ting D., Zheng Sh., Chen G., Dong L. [A Short Synthesis of Bisabolane Sesquiterpenes]. *Molecules*. 2011. vol.16, no.9. pp.8053-8061.
22. Siengalewicz P., Mulzer J., Rinner U. [Synthesis of Protoilludanes and Related Sesquiterpenes]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2011, vol.35, no.2, pp.7041-7055.
23. Duhamel N., Martin D., Larcher R., Fedrizzi B., Barker D. [Convenient synthesis of deuterium labelled sesquiterpenes]. *Tetrahedron Lett.*, 2016, vol.57, no.40, pp.4496-4499.
24. Jian L., Long H., Zhiqiang Zh., Yanxia Zh. [Advances in the Synthesis of Anislactone-Type Sesquiterpenes]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2020, vol.40, no.10, pp.3166-3176.
25. Ju-Fang H., Yu-Lin W. [Synthesis of drimane sesquiterpenes an intramolecular Diels-Alder approach]. *Tetrahedron*, 1988, vol.44, no.7, pp.1933-1940.
26. Tong Y., Ping S., Guan H., Chen J. [Eudesmane-type sesquiterpene diols directly synthesized by a sesquiterpene cyclase in *Tripterygium wilfordii*]. *Biochemical Journal*, 2018, vol.475, no.17, pp.2713-2725.
27. Pirrung M., Morehead A., Goldsmith D. [The Total Synthesis of Natural Products: Acyclic and Monocyclic Sesquiterpenes]. Wiley-Interscience Publ., 1997, 192 p.
28. Zhang C., Rinkel J., Goldfuss B., Dickschat J. [Sesquiterpene cyclizations catalysed inside the resorcinarene capsule and application in the short synthesis of isolongifolene and isolongifolenone]. *Nature Catalysis*, 2018, vol.1, pp.609-615.
29. Blay G., Collado A.M., Pedro J. [Synthesis of Sesquiterpenes via Silicon-Guided Rearrangement of Epoxydecalins]. *Natural Product Communications*, 2019, vol.15, pp.312-317.
30. Yates P., Grewal R., Hayes P., Sawyer J. [Synthesis of cedranoid sesquiterpenes. vol. The biotols]. *Canadian Journal of Chemistry*, 1988, vol.66, no.11, pp.447-451.
31. Ayubov I.G., Gazhieva G.E. Reaktsiya Dil'sa-Al'dera v sinteze terpenov i ikh proizvodnykh [Diels-Alder reaction in the synthesis of terpenes and their derivatives]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2022, vol.29, no.3, pp.5-10.
32. Mamedbeyli E.G., Udalova E.A., Gadzhieva G.E., Ayubov I.G., Ismailova S.V. Sintez, svoystva i oblasti primeneniya monoterpenov i ikh proizvodnykh [Synthesis, properties and areas of application of monoterpenes and their derivatives]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2025, vol.32, no.1, pp.25-33.