Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 5–24.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 1, pp. 5–24.
DOI: 10.14258/jcprm.20260116985

Обзоры

УДК 615.1:547.9:577.1

ГЛЮКОЗИНОЛАТЫ: ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ (ОБЗОР)

© ***М.А. Назлуханян*, А.Г. Курегян, С.В. Печинский***

Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ФГБОУ ВО ВолгГМУ, пр. Калинина, 11, Пятигорск, 357532, Россия, mikhail.nazlukhanyan@mail.ru

В настоящее время в отечественной научной литературе отсутствуют структурированные сведения, объединяющие данные о глюкозинолатах (CLS) как перспективном для исследования классе биологически активных соединений (БАС). В статье приведен систематизированный материал о химической характеристике CLS, объединяющих серосодержащие гликозиды представителей семейства капустные (*Brassicaceae)*, химическая классификация и возможные пути химического синтеза CLS. Отдельно обсужден метаболизм и биологическая активность CLS. Показано, что под действием мирозиназы образуются активные метаболиты, в частности, изотиоционаты (ITC), которые являются основными продуктами гидролиза CLS. Представлен анализ литературных данных о противоопухолевой и кардиопротекторной активностях CLS и их метаболитов. В заключении обсуждены некоторые особенности экстракции CLS из природных источников и основные методы их анализа. Сделан вывод о том, что в дальнейшем при накоплении достаточного экспериментального и теоретического материала данный класс соединений может быть рассмотрен как перспективный для разработки лекарственных средств, направленных на терапию нозологий с высокой медико-социальной значимостью.

Ключевые слова: глюкозинолаты, изотиоционаты, синтез, биологическая активность, капустные, высокоэффективная жидкостная хроматография.

Для цитирования: Назлуханян М.А., Курегян А.Г., Печинский С.В. Глюкозинолаты: химическая характеристика и биологическая активность (обзор) // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 5–24. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260116985.

1. Общая характеристика, химическая классификация и синтез глюкозинолатов

Глюкозинолаты (GLS) – это группа вторичных метаболитов растений, идентифицированная почти для всех представителей порядка каперсовые (*Capparales*), включающего около 30 семейств. Основными источниками GLS принято считать растения семейства капустные (*Brassicaceae*), которое объединяет более 3500 видов растений. Наиболее широкое распространение и хозяйственное значение из них имеют капуста огородная (*Brassica oleracea* L.), репа огородная (*Brassica rapa* L.), рапс масличный (*Brassica napus* L.), брокколи или спаржевая капуста (*Brassica oleracea* Italica Group), иберис горький (*Iberisamara*L.), горчица черная (*Brassica nigra* L.) и другие. GLS и их метаболиты определяют типичный аромат и, как правило, горький вкус производящих растений и их сырья [1–3].

По химической структуре GLS являются тиогликозидами производных аминокислот [4–6]. Химическая структура GLS включает фрагмент β-тиоглюкозы (А), сульфированную оксимную группу (Б) и связанный с ними через центральный атом углерода агликон в виде производного α-аминокислоты (В) (рис. 1).

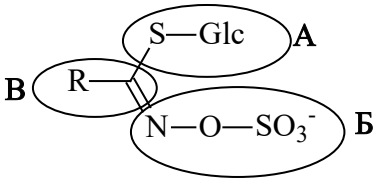


Рис. 1. Общая формула глюкозинолатов (R – углеводородный радикал α-аминокислоты)

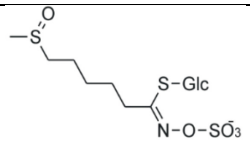
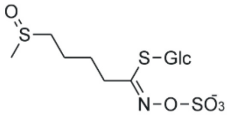
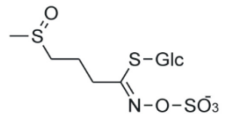
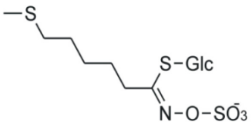
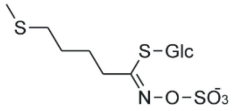
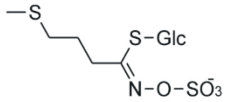
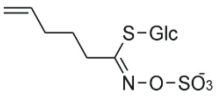
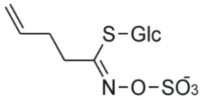
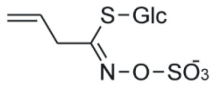
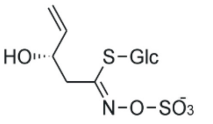
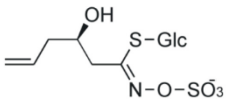
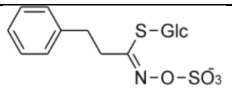
На сегодняшний день известно более 120 GLS [7, 8]. Их принято классифицировать по структуре боковой цепи агликона аминокислоты (рис. 1), а именно по типу аминокислоты-предшественника: 1) алифатические (алкенилглюкозинолаты), синтезированные

* Автор, с которым следует вести переписку.

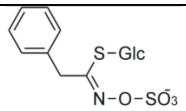
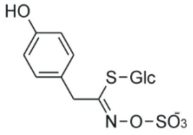
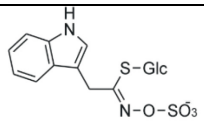
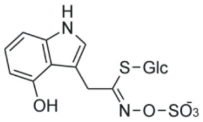
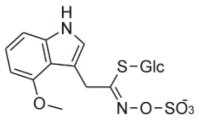
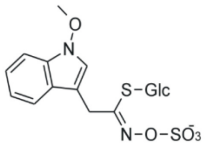
на основе аланина, валина, лейцина, изолейцина, метионина; 2) ароматические (фенилглюкозинолаты), предшественниками которых являются фенилаланин или тирозин; 3) индольные (индолглюкозинолаты), для которых исходной аминокислотой является триптофан. Кроме того, в процессе биосинтеза и метаболизма возможно изменение структуры агликона GLS, в частности, он может подвергаться гидроксилированию, гликозилированию, О-метилированию, ацилированию и другим трансформациям, что приводит к биосинтезу, например, индоилметилглюкозинолатов или индоилгидроксиглюкозинолатов и других производных GLS [9–12].

В соответствии с классификацией по типу боковой цепи агликона аминокислоты структурные формулы наиболее распространенных GLS приведены в таблице 1, химические названия GLS представлены согласно данным ресурса «Pubchem» и номенклатуре ИЮПАК [13, 14].

Таблица 1. Структурные формулы некоторых представителей глюкозинолатов [9–12]

№	Название GLS	Структурная формула GLS
1	*2*	*3*
	алкенилглюкозинолаты (алифатические)	
1	Глюкоалиссин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1Z)-6-(метилсульфинил)-N-сульфооксигексанимидотиоат	
2	Глюкорафанин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-5-(метилсульфинил)-N-сульфооксипентанимидотиоат	
3	Глюкоиберин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-4-(метилсульфинил)-N-сульфооксибутанимидотиоат	
4	Глюкобертероин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-6-(метилсульфанил)-N-сульфооксигексанимидотиоат	
5	Глюкоэруцин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил 5-(метилсульфанил)-N-сульфооксипентанимидотиоат	
6	Глюкоибервирин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-4-(метилсульфанил)-N-сульфооксибутанимидотиоат	
7	Глюкобрассиканапин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1Z)-N-сульфооксигекс-5-енимидотиоат	
8	Глюконапин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-N-сульфооксипент-4-енимидотиоат	
9	Синигрин (E)-1-[(2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-илсульфанил]бут-3-енилиденаминий сульфат	
10	Прогоитрин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (3R)-3-гидрокси-N-сульфооксипент-4-енимидотиоат	
11	Глюконаполиферин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (3S)-3-гидрокси-N-сульфооксигекс-5-енимидотиоат	
	фенилглюкозинолаты (ароматические)	
12	Глюконастуртиин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил 3-фенил-N-сульфооксипропанимидотиоат	

Окончание таблицы 1

1	*2*	*3*
13	Глюкотропеолин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил 2-фенил-N-сульфооксиэтанимидотиоат	
14	Глюкосиналбин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1E)-2-(4-гидроксифенил)-N-сульфооксиэтанимидотиоат	
	индолилметилглюкозинолаты (индолпроизводные)	
15	Глюкобрассицин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил 2-(1H-индол-3-ил)-N-сульфооксиэтанимидотиоат	
16	Гидроксиглюкобрассицин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1Z)-2-(4-гидрокси-1H-индол-3-ил)-N-сульфооксиэтанимидотиоат	
17	4-Метоксиглюкобрассицин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1Z)-2-(4-метокси-1H-индол-3-ил)-N-сульфооксиэтанимидотиоат	
18	Неоглюкобрассицин (2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-тригидрокси-6-(гидроксиметил)оксан-2-ил (1Z)-2-(1-метоксииндол-3-ил)-N-сульфооксиэтанимидотиоат	

Как было указано выше, исходными соединениями в биосинтезе GLS являются α-аминокислоты, этот процесс на сегодняшний день изучен достаточно подробно, в частности, описан процесс образования GLS и широкий перечень генов, экспрессирующих основные ферменты, регулирующие биосинтез данных соединений [15–19]. Биосинтез GLS можно представить в виде трех основных этапов: 1) первичное удлинение цепи α-аминокислоты; 2) формирование основной структуры GLS; 3) вторичные модификации боковой цепи α-аминокислоты.

На первом этапе под действием аминотрансферазы происходит дезаминирование аминокислот с образованием оксокислоты, которая затем вступает в цикл удлинения углеродной цепи за счет последовательных процессов конденсации ацетил-КоА, изомеризации и окислительного декарбоксилирования, регулируемых соответствующими синтетазами, изомеразами и оксидоредуктазами (рис. 2).

Таких циклов происходит несколько, каждый из них удлиняет структуру боковой цепи на один фрагмент гомологической разности [20, 21]. Далее модифицированная оксокислота вступает в реакцию трансаминирования, вновь образуя аминокислоту с уже необходимой длиной углеродной цепи.

Биохимический смысл второго этапа – это формирование ядра GLS (рис. 3), которое заключается в преобразовании α-аминогруппы в сульфоксимную и замене α-карбоксильной группы на тиогликозидный фрагмент.

Для данного этапа можно выделить несколько последовательных стадий. Первая стадия представляет цитохром P-450-зависимое образование альдоксимов с последующим окислением до активированных соединений – оксидов нитрилов или аци-нитросоединений [22]. Далее следует конъюгация с донором серы и отщепление алкильного фрагмента донора при помощи специфической лиазы. На последней стадии второго этапа происходит присоединение остатка β-D-глюкозы к образовавшейся сульфгидрильной группе под действием соответствующей гликозилтрансферазы.

Третий этап биосинтеза GLS – это вторичные преобразования боковой цепи (рис. 1). Он является определяющим для финальной структуры GLS и регулируется видоспецифичными ферментами [18–22].

Получение GLS из природных источников вызывает определенные трудности, связанные со спецификой их биохимии, поэтому химический синтез закрепился как наиболее распространенный и эффективный способ получения химически чистых GLS и их стандартных образцов. Большая часть исследований *invitro*, касающихся изучения биологической активности и метаболических превращений GLS, была проведена именно на химически синтезированных образцах [23].

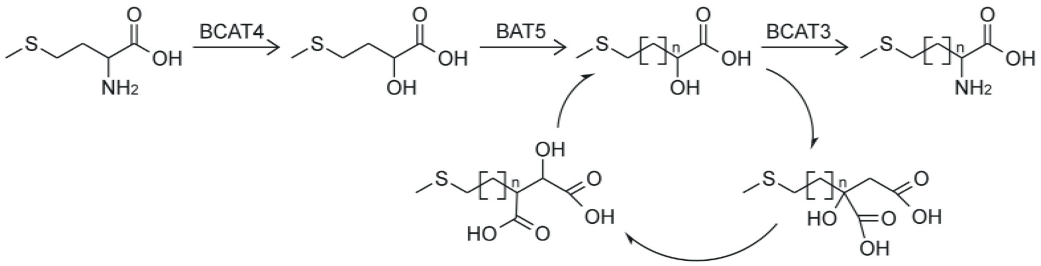


Рис. 2. Пример схемы первого этапа биосинтеза глюкозинолатов (BCAT4 – Аминотрансфераза с разветвленной цепью 4; BAT5 – Транспортер желчных кислот 5; BCAT3 – Аминотрансфераза с разветвленной цепью 3) [19]

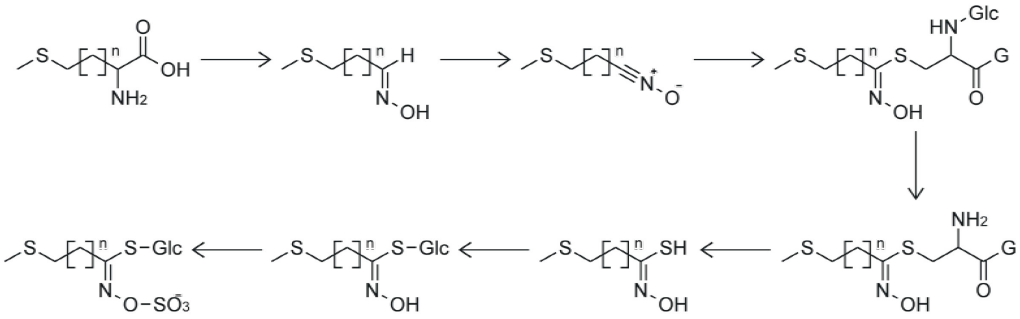


Рис. 3. Пример схемы второго этапа биосинтеза глюкозинолатов [22]

Традиционная схема синтетического получения GLS базируется на двух природных процессах разрушения О-сульфатированного тиогидроксимата, связанного через метиленовый «шарнир» с вариабельной агликоновой цепью (R_1). Это могут быть или аномерный разрыв связи углерод-сера, или ее гидроксиматное разрушение (рис. 4). В обоих случаях разрыв ферментируется мирозиназой – единственной специфичной гликогидролазой, катализирующей разрушение связи углерод-сера.

Схема аномерной деструкции (рис. 5) исходит из концепции гликозилирования, где электрофильный донор – гликозил реагирует с нуклеофильным акцептором – тиогидроксиматом.

Схема синтеза на основе тиогидроксиматного разрушения связи углерод-сера (рис. 6) заключается в том, что тиогликозид присоединяется к оксиду нитрила.

Оксиды нитрилов нестабильны, их получение происходит за счет 1,3-элиминирования в основных условиях предшественников гидроксимоилхлорида, выступающих ключевыми промежуточными продуктами [25, 26].

Возможно, что в ближайшее время химический синтез может стать приоритетным путем получения GLS, так как использование в качестве катализаторов коммерчески доступных энзимов повысит выход целевого продукта по сравнению с выделением GLS из растительного сырья и приведет к «озеленению» процесса получения GLS.

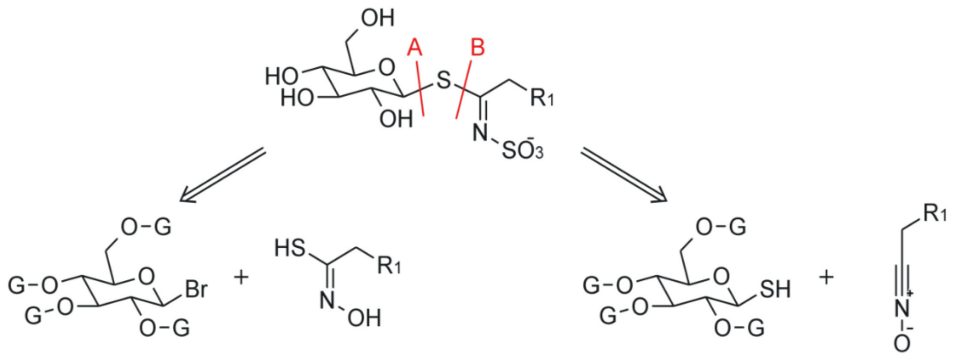


Рис. 4. Схема ретросинтеза глюкозинолатов: A – аномерный разрыв связи углерод-сера; B – гидроксиматный путь разрыва; G –защитная группа [24]

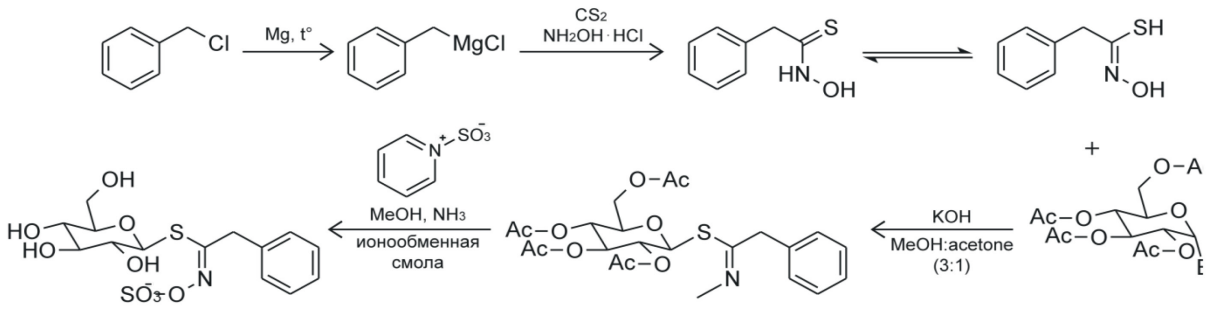


Рис. 5. Схема синтеза глюкотропеолина на основе аномерного разрушения связи углерод-сера [24]

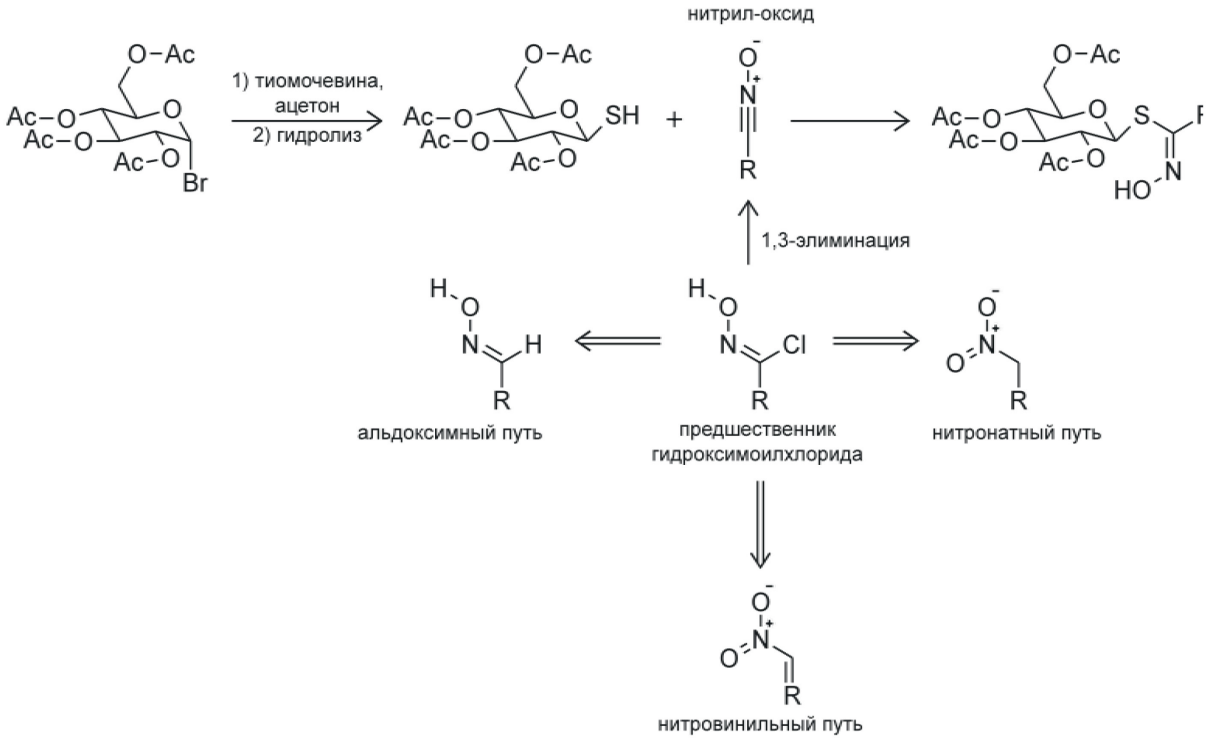


Рис. 6. Схема синтеза глюкозинолатов на основе гидроксиматного разрыва связи углерод-сера [21]

2. Метаболизм и биологическая активность гликозинолатов

2.1. Метаболические превращения глюкозинолатов

Как было описано выше, GLS являются специфичными вторичными метаболитами растений, принадлежащих к порядку *Brassicales*, и играют для них фундаментальную защитную роль [26].

Одним из важных метаболических превращений GLS является гидролиз, катализируемый мирозиназой – ферментом, специфическим для всех растений, синтезирующих GLS. Мирозиназа и GLS в тканях локализованы изолированно друг от друга и вступают в реакцию только после воздействия внешних факторов. В роли основных хранилищ GLS могут выступать особые S-клетки, мирозиназа же локализована в специфических мирозиновых клетках. Внутри клетки GLS накапливаются в вакуоли, а мирозиназы – в тельцах эндоплазматического ретикулума или в цитозоле [27]. При механических повреждениях растений, вызванных внешними факторами, например, воздействием животных или насекомых, мирозиназа высвобождается и переходит в активную форму. Активированная мирозиназа гидролизует GLS, в результате чего образуются β-D-глюкоза и нестабильный агликон в виде тиоцианата, изотиоцианата, нитрила, тионитрила или других соединений [27]. Такой защитный механизм позволяет растениям адаптироваться к различным условиям обитания и противостоять внешним угрозам, например, насекомым-вредителям. Продукты гидролиза

GLS отпугивают потенциальных вредителей и тем самым защищают растение от повреждений [28]. Кроме того, исследования показывают, что синтез GLS, их состав и разнообразие могут изменяться под влиянием различных стрессовых факторов, таких как засуха, недостаток питательных веществ, изменение температуры, что также влияет на адаптацию растений к неблагоприятным условиям. В частности, pH среды, температура и наличие определенных ферментов могут существенно влиять на характер протекания реакций гидролиза и, соответственно, на состав конечных продуктов гидролиза GLS [29]. Кроме того, индивидуальные особенности растительного организма, включая генетические вариации и адаптационные механизмы, играют важную роль в определении путей биосинтеза и трансформации соединений этого класса биологически активных соединений (БАС) [30]. Структура и разновидности метаболитов определяются строением исходных соединений, физико-химическими свойствами среды и некоторыми индивидуальными особенностями метаболизма растений [29].

Ряд исследований, а также эпидемиологические данные показали, что употребление в пищу растений семейства *Brassicaceae* значительно снижает риск развития онкологических заболеваний, таких как рак легких, желудка, толстой кишки, молочной, поджелудочной железы [30–33], а также некоторых заболеваний сердечно-сосудистой системы, например, атеросклероза и инфаркта миокарда. Эти эффекты связывают с наличием у производных GLS антиоксидантных свойств, предотвращающих атеросклеротическое повреждение кровеносных сосудов [34–36]. Несмотря на то, что эти растения содержат большое количество БАС, таких как флавоноиды, каротиноиды, витамины, алкалоиды, именно с GLS и их метаболитами связывают перечисленные виды биологической активности [30, 37–39].

2.2. Противоопухолевая активность метаболитов глюкозинолатов

Развитие онкологических заболеваний может быть спровоцировано канцерогенными ксенобиотиками, которые в процессе печеночного метаболизма превращаются в активные соединения, повышающие риск развития онкологических заболеваний. В таких случаях принципы фармакотерапии и профилактики канцерогенеза основываются на деактивации механизмов, способствующих превращению канцерогенов в активные метаболиты. Для этих целей также применяются GLS, которые кроме прямой цитостатической активности способны оказывать опосредованные антиканцерогенные эффекты. Продукты их гидролиза, а именно изотиоционаты (ITC), модулируют экспрессию и активность ферментов, участвующих в процессах биотрансформации ксенобиотиков, в том числе канцерогенов. ITC также способны выступать в роли индукторов детоксикации канцерогенов. Активируя специфические ферменты, они способствуют катализу реакций, разрушающих активные центры канцерогенов [40–44]. Так, F. Tasnim с соавторами исследовали потенциал использования GLS в качестве ингибиторов одного из основных факторов патогенеза рака желчного пузыря. Испытания, проведенные методами *in silico* и *in vitro*, подтвердили высокую ингибирующую активность GLS и продемонстрировали перспективу их использования для создания инновационных лекарственных препаратов [45]. В работе [46] авторы исследовали влияние экстрактов некоторых представителей *Brassicaceae* на жизнеспособность клеток рака молочной железы. Результаты показали, что при правильном подборе концентрации экстрактов наблюдается заметное селективное подавление пролиферации раковых клеток. Аналогичные результаты, отражающие высокую противоопухолевую активность GLS и их производных, были получены в ряде других исследований [47–49].

Таким образом, на сегодняшний день большая часть исследований биологической активности GLS посвящена доказательству противоопухолевой активности самих GLS и их метаболитов [30–33]. Она может быть связана с прямым подавлением клеточного роста, ингибированием метаболизма раковых клеток, активацией апоптоза и другими механизмами. Большая вариация структурных изменений GLS обусловливает разнообразие продуктов гидролиза, обладающих различными свойствами и, как следствие, широким спектром видов активности, проявляемых этими продуктами. Предполагается, что главную роль в биохимии GLS играют ITC, так как они выступают основными продуктами их гидролиза [50]. Как показал анализ литературных данных, большая часть специфичных фармакологических эффектов, зафиксированных для растений семейства *Brassicaceae*, связана именно с ITC ввиду их способности модулировать экспрессию и активность большого числа энзимов и медиаторов [40–43, 51].

Так, сульфорафен и сульфорафан (SFN) – ITC (рис. 7), выделенные из овощей семейства *Brassicaceae*, таких как брокколи и цветная капуста, в экспериментах продемонстрировали значительную антипролиферативную активность при заболеваниях толстой кишки, печени, поджелудочной железы, легких, молочных

желез, а также органов женской репродуктивной системы [40, 41, 51]. Было показано, что данные соединения способны ингибировать ферменты метаболизма раковых клеток и выступать индукторами апоптоза [52]. В исследовании, проведенном в 2024 году J. Quizhpe с соавторами, были впервые определены основные мишени сульфорафена, связанные с ингибированием опухолевого роста [53].

Еще одним примером высокоактивных БАС данной группы является фенилэтилизотиоцианат (PEITC) (рис. 8), который продемонстрировал ряд положительных эффектов на органы желудочно-кишечного тракта.

Данное соединение оказывает выраженное антиоксидантное действие, блокирует фактор транскрипции NF-κB, контролирующий экспрессию генов, кодирующих провоспалительные цитокины, например, интерлейкин-1, интерлейкин-6, фактор NF-α (фактор некроза опухоли) и способствующий ангиогенезу. Кроме того, PEITC оказывает ингибирующее влияние на клеточную пролиферацию и индуцирует апоптоз в опухолевых клетках, а также модулирует метаболизм канцерогенов, усиливая активность ферментов, ответственных за их детоксикацию и выведение из организма. Также имеются сведения о токсичности PEITC. Клинические исследования показали, что прием до 80 мг PEITC в день безопасен для человека. При увеличении дозы до 120–160 мг могут возникать токсические эффекты. Для терапевтического действия рекомендуемая доза составляет 10–30 мкг/л [55].

Схожую фармакологическую активность демонстрирует бензилизотиоцианат (BITC) (рис. 9), который является одним из наиболее изученных природных ITC и обнаруживается в таких представителях семейства Brassicaceae, как брокколи, водяной кресс и др.

BITC проявляет антипролиферативное действие, вызывая остановку клеточного цикла и индуцируя апоптоз в различных типах раковых клеток. Индукция апоптоза реализуется посредством нескольких внутриклеточных механизмов. BITC вызывает образование активных форм кислорода (АФК), что приводит к нарушению митохондриальной функции и снижению мембранного потенциала митохондрий. Это способствует высвобождению проапоптотических факторов, таких как цитохром C и AIF (апоптозиндуцирующий фактор), что в конечном итоге приводит к активации каспаз и запуску апоптоза. В частности, BITC увеличивает экспрессию рецепторов, таких как Fas, Fas-L, FADD и TRAIL, что ведет к активации каспаз, способствующих апоптозу. Также под действием BITC происходит индукция митоген-активированных протеинкиназ, что приводит к фосфорилированию белков, участвующих в регуляции апоптоза и клеточного цикла. Блокировка клеточного цикла на определенных его стадиях происходит за счет активации киназ (Chk1 и Chk2), являющихся ключевыми сигнальными белками клеточного ответа на повреждение ДНК, уменьшения экспрессии циклинов и циклин-зависимых киназ, ингибирования экспрессии и активности матриксных металлопротеиназ, которые играют ключевую роль в разрушении внеклеточного матрикса и облегчают метастазирование [56].

Метилсульфинилгексилизоцианат (6-MSITC) (рис. 10), выделенный из васаби (*Eutrema japonicum* Miq., Koidz.), также проявляет активность в борьбе с различными типами рака, включая колоректальный и желудочный рак, а также рак молочной железы.

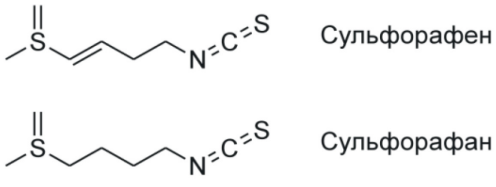


Рис. 7. Химическая структура сульфорафена и сульфорафана [54]

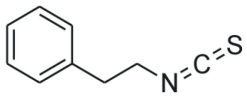


Рис. 8. Химическая структура PEITC (2-изотиоцианатоэтилбензол) [55]

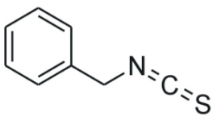


Рис. 9. Химическая структура BITC (изотиоцианатометилбензол) [56]

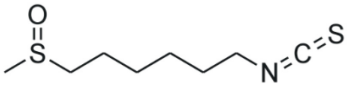


Рис. 10. Химическая структура 6-MSITC (1-изотиоцианато-6-(метилсульфинил)гексан) [57]

Как и PEITC, данное соединение способно блокировать фактор транскрипции NF-κB, снижая тем самым интенсивность ангиогенеза и, как следствие, подавляя опухолевый рост. Кроме того, 6-MSITC активно вмешивается в работу других сигнальных путей (ERK1/2-ELK1/CHOP/DR5, PI3K/AKT/mTOR, Nrf2/Keap1-ARE и др.), обеспечивая альтернативные механизмы реализации противораковых эффектов.

6-MSITC показал свою эффективность в исследованиях на различных клеточных линиях и *in vivo* в моделях на животных. В экспериментах с моделями на мышах было установлено, что 6-MSITC эффективно ингибирует рост опухолей молочной железы, особенно тех, которые экспрессируют низкие уровни рецептора эстрогена (ER-). Это происходит за счет снижения активности NF-κB и уровня фосфорилированного AKT (протеинкиназы B), что способствует апоптозу раковых клеток. Было показано, что 6-MSITC подавляет развитие желудочного рака у крыс, вызванного канцерогенами, такими как N-метилоксо-N'-нитро-N-нитрозогуанидин (MNNG). Предполагается, что это связано с его способностью снижать секрецию соляной кислоты в желудке и тем самым уменьшать риск развития язв и злокачественных новообразований.

Исследования на клеточных линиях (HCT116) колоректального рака человека продемонстрировали, что 6-MSITC вызывает апоптоз независимо от статуса гена p53. Это указывает на то, что механизм действия 6-MSITC выходит за рамки одного конкретного сигналального пути и может быть универсальным для разных типов раковых клеток [57].

Дополнительно установлено, что 6-MSITC оказывает выраженное нейропротекторное действие, что делает его перспективным кандидатом для лечения нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и Паркинсона. Эксперименты на животных моделях показали, что 6-MSITC улучшает когнитивные функции, снижает оксидативный стресс и воспаление в мозге, а также защищает дофаминергические нейроны. Эти эффекты связаны с активацией Nrf2, являющегося главным регулятором клеточного ответа на окислительный стресс и другие неблагоприятные внешние условия, и стабилизацией антиоксидантной защиты мозга [57].

Работа [58] посвящена изучению противораковых и лечебных свойств ITC, полученных из моринги масличной *(Moringa oleifera* Lam.). Особое внимание авторы уделили изоцианату 4-(α-L-рамнозилокси) бензилизотиоцианат (MIC-1), который является основным активным компонентом семян моринги. Исследования показали, что MIC-1 может ингибировать рост раковых клеток, способствовать апоптозу и подавлять метастазирование опухолей. Важным является то, что этот ITC оказывает минимальное воздействие на нормальные клетки организма.

Предполагается, что противораковое действие MIC-1 связано с увеличением экспрессии проапоптотических белков, таких как Bax и p53 и одновременным понижением экспрессии антиапоптотического белка Bcl-2, увеличением внутриклеточного уровня ROS, что приводит к окислительному стрессу и повреждению митохондрий, нарушением мембранного потенциала митохондрий и активацией каспаз, которые расщепляют ключевые структурные белки. MIC-1 также способен подавлять рост и миграцию раковых клеток путем воздействия на различные сигнальные пути. Способность данного соединения влиять сразу на несколько уровней регуляции клеточных процессов делает его перспективным кандидатом для терапии различных типов рака.

Кроме того, авторами установлено, что MIC-1 также проявляет активность против хронических заболеваний, таких как диабет, ожирение, воспалительные заболевания кишечника. Противовоспалительное действие MIC-1 связано с его способностью модулировать активность ключевых сигнальных путей, участвующих в воспалении. MIC-1 ингибирует ядерную транслокацию фактора NF-κB, что уменьшает продукцию провоспалительных цитокинов и медиаторов воспаления, стимулирует активацию транскрипционного фактора Nrf2, который регулирует экспрессию генов, ответственных за детоксикацию и защиту от оксидативного стресса, снижение синтеза оксида азота, что уменьшает воспалительную реакцию [58].

Как показал анализ литературных данных, механизмы противоопухолевой активности имеют выраженное сходство, т.е. они универсальны для многих ITC, независимо от источника их получения. Этот факт указывает на наличие общих фармакофорных групп или структурных элементов, определяющих их биологическую активность. К таковым можно отнести тиокарбаматный фрагмент (-N=C=S).

Резюмируя, можно отметить, что основные механизмы противоопухолевой активности ITC включают индукцию апоптоза через каскады биохимических реакций, снижение активности ядерного фактора NF-κB, который играет ключевую роль в регуляции воспалительных процессов, и модуляцию экспрессии и активности ферментов, участвующих в процессах биотрансформации ксенобиотиков и канцерогенов.

2.3. Кардиопротекторная активность глюкозинолатов и их метаболитов

Включение овощей семейства *Brassicaceae* в рацион может служить профилактической мерой против хронических заболеваний, в частности, сердечно-сосудистых, а их маркерные БАС – GLS и ITC являются мощными антиоксидантами [49]. Для многих из них исследованы кардиопротекторные эффекты, связанные с антиоксидантными свойствами, в связи с чем GLS зарекомендовали себя как класс соединений, перспективный для лечения сосудистых патологий [59–61].

В литературе описан ряд ITC, обладающих кардиопротекторным действием. Среди этих соединений сульфорафан, фенилэтилизотиоцианат, моринги́н, эруцин, аллилизотиоцианат и некоторые другие. Исследования *in vivo* и *in vitro* показали, что они способны нейтрализовать губительное воздействие АФК, являющихся основным фактором поражения кровеносных сосудов. Кроме прямой антиоксидантной активности, кардиопротекторный эффект ITC обусловлен их супрессорной активностью по отношению к воспалительным каскадам и способностью ингибировать митохондриальный путь апоптоза [61].

Кардиопротективные эффекты ITC обусловлены тем, что они способны формировать в организме сероводород, являющийся важным эндогенным медиатором. Он играет существенную роль в процессе обеспечения, так называемого, фармакологического прекондиционирования, которое представляет собой своего рода подготовку тканей сердца к состоянию гипоксии и защиту их от повреждений, вызванных ишемией/реперфузией либо гипоксическим стрессом [62, 63]. В присутствии аминокислоты L-цистеина происходит выделение достаточного количества сероводорода, что способствует вазорелаксации и защищает ткани сердца от последствий ишемических нарушений. Такие защитные механизмы тесно связаны с активацией митохондриальных АТФ-зависимых калиевых каналов (митоКАТФ-каналов), играющих значимую роль в процессах защиты миокарда при ишемическом стрессе. Результаты молекулярно-динамического моделирования показали, что наибольшую биологическую активность среди всех исследованных соединений проявляет 3-пиридил-изотиоцианат, обладающий оптимальными физико-химическими свойствами для выполнения описанных функций [64].

Экстракт семян руколы (*Eruca sativa* Mill.) показал способность медленно высвобождать сероводород в клеточных моделях. Применение экстракта у крыс с гипертензией привело к значительному снижению артериального давления. Также экстракт продемонстрировал защитные эффекты против острого инфаркта миокарда у крыс, вызванного временной окклюзией коронарной артерии. Защитный эффект экстракта был связан с действием митоКАТФ. Кроме того, экстракт уменьшал накопление кальция в изолированных митохондриях сердца, что также способствовало защите от повреждений. Авторы связывают кардиопротекторные свойства экстракта с наличием в нем ITC, которые могут выделять сероводород при метаболизме, в частности, эруцина [65].

Исследование [66] посвящено изучению положительных эффектов GLS и ITC на течение сердечно-сосудистых и нейродегенеративных заболеваний. Отмечается большой спектр кардио- и нейропротекторных эффектов данных соединений. Одним из ключевых механизмов является их способность нейтрализовать активные кислородные радикалы, которые вызывают окислительный стресс – основной фактор риска развития сердечно-сосудистых заболеваний и нейродегенеративных расстройств. Изотиоцианаты стимулируют активность фактора транскрипции Nrf2, который регулирует экспрессию генов, ответственных за защиту клеток от окислительного повреждения. Это приводит к увеличению синтеза антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза (SOD) и каталаза (CAT), что помогает снизить уровень АФК и защитить клеточные мембраны от повреждений.

Интересным дополнительным аспектом кардиопротекторного действия ITC является подавление воспалительных процессов за счет ингибирования сигнальных путей NF-κB. Воспаление играет ключевую роль в патогенезе многих хронических заболеваний, включая атеросклероз и нейродегенерацию. Подавление активности NF-κB способствует уменьшению воспаления и опосредованно снижению риска сердечно-сосудистых осложнений и нейроваскулярных нарушений [58, 67, 68]. В этом контексте особо отмечается роль аллилизотиоцианата (AITC). A. Tarar с соавторами [67] была проведена всесторонняя оценка антиканцерогенной активности данного соединения. Исследователи изучили механизмы действия AITC на различные виды раковых клеток, а также разработали эффективные методы его доставки для потенциального клинического применения. В процессе этого они дополнительно установили, что метаболит AITC – N-ацетил-S-(N-аллилтиокарбамоил)-l-цистеин эффективен против малярийных паразитов в крови [68]. Данный результат позволил им предположить, что употребление в пищу овощей семейства *Brassicaceae*, содержащих AITC, может использоваться для профилактики малярии.

В связи с тем, что именно продукты гидролиза GLS проявляют противоопухолевую, противовоспалительную, кардиопротекторную, нейропротекторную виды активности, в дальнейшем при накоплении достаточного экспериментального и теоретического материала этот класс соединений можно рассматривать как перспективный для разработки лекарственных средств, направленных на терапию нозологий, имеющих высокую медико-социальную значимость.

3. Некоторые особенности экстракции глюкозинолатов из природных источников и основные методы их анализа

При нарушении целостности клеточных структур растений, содержащих GLS, происходит активация мирозиназы, которая катализирует гидролиз этих соединений [8, 27, 28]. В результате процесса образуются различные продукты, включая ITC, тиоцианаты, нитрилы и эпитиолы [29]. Очевидно, что традиционные варианты подготовки сырья к экстракции и сам этот процесс вызывает выброс мирозиназы и, как следствие, гидролиз GLS. Для предотвращения нежелательного гидролиза GLS важно провести деактивацию мирозиназы до начала экстракции. Это обычно достигается путем проведения экстракции при высоких температурах (50–100 °C), поскольку фермент теряет свою активность при таких условиях [39, 51]. Однако необходимо учитывать, что длительное воздействие высокой температуры может привести к разложению самих GLS, поэтому процесс экстракции следует проводить максимально быстро [8]. Процесс подготовки образца перед идентификацией и количественным определением аналита с использованием аналитических методов является ключевым этапом, который помогает избежать утраты образца или его деградации. Чтобы этого избежать, рекомендуется проводить сублимационную сушку небольших растений целиком или их частей при температуре -20 °C, после чего хранить сырье в условиях сухого льда (-80 °C). Для крупных растений предпочтительнее немедленная заморозка в жидком азоте, что позволяет исключить активацию мирозиназы [69].

Контролируемый гидролиз играет ключевую роль в определении содержания ITC в растительном материале. Условия гидролиза, такие как pH среды, температура и присутствие специфических факторов напрямую влияют на выход и чистоту конечного продукта. Неправильно подобранные условия могут привести к образованию побочных продуктов, снижению выхода целевых ITC или даже полной деградации исходных веществ [70]. S. Kyriakou с соавторами провели всесторонний анализ ключевых параметров, влияющих на процесс экстракции и гидролиза ITC. Они подчеркнули, что успех в выделении этих соединений зависит от множества факторов, включая выбор подходящего растворителя, контроль pH и температуры, а также учет химической стабильности самих ITC. Особое внимание уделяется роли мирозиназы в процессе гидролиза GLS, поскольку активность этого фермента существенно влияет на выход и качество конечного продукта. Авторы предложили ряд оптимизированных методик, позволяющих повысить эффективность экстракции и снизить риск деградации ITC (табл. 2) [70].

Исследование [71] посвящено изучению влияния различных методов тепловой обработки на содержание CLS в фруктах и овощах, а также на их кардиопротекторные свойства. Авторами рассматриваются такие методы, как кипячение, пропаривание, суперпропаривание, бланширование и микроволновая обработка. Показано, что каждый метод оказывает различное воздействие на стабильность или деградацию GLS и их кардиопротекторный эффект. Например, кипячение может привести к значительным потерям GLS, тогда как пропаривание и суперпропаривание могут способствовать увеличению выхода этих соединений. Микроволновая обработка, хотя и требует дополнительных исследований для определения оптимальных параметров, показывает перспективы стабилизации GLS в процессе подготовки сырья к экстракции.

В работе [72], опубликованной исследователями Авейрусского университета, отмечается, что заморозка сырья перед сушкой увеличивает экстрагируемость пигментов и фенольных соединений, но менее эффективна для сохранения глюкозинолатов. Воздушная сушка при 40 °C позволяет сохранить около 70% фенольных соединений и 49% пигментов, однако значительно снижает содержание GLS. Отмечается, что предварительное бланширование перед воздушной сушкой может уменьшить количество всех биоактивных соединений до уровня ниже 50%.

Важным аспектом достоверности анализа GLS является обеспечение их стабильности в исходном сырье. Одним из основных факторов, влияющих на стабильность GLS, является температура. Хранение при низкой температуре (около 4 °C) обеспечивает большую стабильность GLS. Заморозка при -20 °C также может использоваться для долгосрочного хранения этих соединений. Рекомендуется также использовать герметичную упаковку для сырья и предотвращать попадания на него солнечных лучей. GLS остаются

стабильными в буферных растворах, таких как 0.1 М раствор аммония ацетата даже при комнатной температуре. Однако в небуферизированных растворах при комнатной температуре стабильность GLS снижается. В водных растворах, при низких температурах (-20 °C) GLS стабильны в течение девяти дней. При комнатной температуре стабильность водных растворов GLS снижается [73].

Таблица 2. Условия экстракции и идентификации некоторых ITC [70]

ITC	Условия, при которых GLS превращаются в соответствующий ITC		Особенности экстракции	Длина волны, при которой обнаруживается ITC, нм
	pH	Температура, °C		
SFN	7.0, 10.0	37	Экстракция SFN часто осуществляется дихлорметан или этилацетат, после предварительной обработки образцов для гидролиза глюкорапанаина.	280
AITC	7.0	<60	Экстракция с помощью суперкритической флюидной экстракции с использованием сверхкритического углекислого газа в качестве растворителя.	225
BITC	6.5–7.0	16–18	Экстракции включают жидкостно-жидкостную экстракцию с использованием хлороформа или ацетона, иногда с добавлением ультразвуковой обработки.	242
PEITC	7.0	25	Экстракция с использованием различных методов, включая сверхкритическую флюидную экстракцию или экстракцию с помощью неионных сурфактантов	254

Поскольку GLS представляют собой водорастворимые соединения, для их выделения из растительного материала часто применяют метод жидкостной экстракции с использованием различных типов растворителей – водных, органических и смешанных. Согласно литературным данным, наиболее эффективной оказывается экстракция с помощью протогенных растворителей, таких как метанол [74], благодаря их способности хорошо растворять полярные молекулы GLS.

Некоторые исследования предлагают модифицировать традиционные методы экстракции, например, повторять цикл экстракции несколько раз вместо одного или использовать последовательные циклы экстракции различными растворителями. Также обсуждается использование жидкостной экстракции под давлением (PLE), которая признается экологически чистым методом, использующим воду в качестве растворителя. Хотя этот метод имеет преимущества в плане времени и эффективности, он может быть неприменим для большого количества образцов и не всегда доступен. Современные методы, такие как микроволновая или ультразвуковая экстракция, также обладают рядом преимуществ и могут быть рассмотрены для повышения эффективности процесса экстракции GLS. Микроволновая экстракция позволяет сократить время экстракции и снизить потребление растворителей [75]. Ультразвуковая экстракция использует эффект акустической кавитации для увеличения проникновения растворителя через клеточные стенки и повышения эффективности экстракции. Однако равномерное распределение энергии ультразвука может быть проблемой, поэтому размер ультразвукового зонда должен быть тщательно подобран [76].

Очевидно, что процесс экстракции GLS из природных источников неразрывно связан с методами контроля технологического процесса и анализом целевых GLS. Контроль содержания GLS строится на двух подходах, основанных на присутствии или отсутствии сульфатной группы в структуре анализируемого GLS. Многие исследования проводились с использованием метода преобразования интактных GLS в десульфо-GLS перед их определением методом жидкостной хроматографии (ЖХ). Этот процесс требует подготовки колонки для десульфации и часто приводит к снижению эффективности хроматографической системы и низкой воспроизводимости результатов. С развитием аналитической химии акцент сместился на прямое определение интактных GLS. Для этого используются более простые и эффективные методы экстракции. Один из наиболее распространенных методов включает использование нагретого раствора этанола или метанола для экстракции GLS после предварительной дезактивации мирозиназы [77].

Наиболее широко используемым методом анализа GLS является высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) в сочетании со спектрофотометрическим либо масс-спектрометрическим детектированием (ВЭЖХ-МС) и, как правило, включает этап десульфатации, который проводится путем добавления в водный раствор сульфатазы. Этот прием нашел широкое распространение, так как на стандартных

колонках C18 десульфатированные GLS удерживаются лучше, нежели необработанные [78]. Такой подход к анализу GLS используется достаточно широко, однако он не лишен недостатков, потому что существует вероятность неполной десульфатации, что может исказить результаты определения. К тому же к настоящему моменту разработаны методы анализа, позволяющие эффективно разделять и определять GLS, минуя этап десульфатации [79].

В работе [80] авторами был разработан хроматографический метод, позволивший достоверно определить состав и содержание GLS в трех представителях семейства *Brassicaceae* (турнепс, канола, рапс). Для каждого растения была проведена экстракция GLS из листьев и стеблей с помощью модифицированного метода. Предотвращения активности мирозиназы авторы добились использованием комбинации методов. Сразу после сбора растительные образцы замораживали при -4 °C, а затем подвергали лиофилизации, что позволило минимизировать контакт GLS с ферментами. Экстракцию проводили 70% метанолом, что способствовало дополнительной инактивации мирозиназы. Экстрагированные образцы анализировались методом ВЭЖХ-МС. Использовался градиентный режим элюирования. Подвижная фаза состояла из двух компонентов: А (раствор уксусной кислоты в воде (0.1% об./об.) и В (метанол). Программа градиента начиналась с соотношения А : В 80 : 20 (по объему) и постепенно увеличивалась до 100% метанола за 12.5 мин. После этого колонка промывалась чистым метанолом в течение 4 мин перед следующим циклом инжекции. Для разделения GLS использовали колонку 2.1 × 150 мм с частицами размером 2.2 мкм. Температура в термостате колонок поддерживалась на уровне 30 °C.

ВЭЖХ с детекцией диодной матрицей и квадрупольным времяпролетным масс-спектрометром (HPLC-DAD-qTOF) широко используется для изучения состава и количественного анализа GLS и ITC. Метод был применен в работе [81] для анализа различных образцов рапса, подвергшихся разным условиям обработки. Пробоподготовка включала экстракцию GLS из растительных материалов с использованием водно-метанольных растворов. Экстракт очищался от белков путем осаждения солями металлов и фильтрации через мембрану с размером пор 0.2 мкм. Затем проводится анализ с использованием системы HPLC-DAD-qTOF. Колонки EC-C18 с частицами размером 2.7 мкм используются для разделения компонентов смеси. Элюирование осуществляется с использованием градиента воды с добавлением муравьиной кислоты (А) и метанола (Б). Детектирование осуществляется одновременно двумя способами: с помощью диодной матрицы (DAD) на длине волны 229 нм и масс-спектрометрии в отрицательном режиме. Масс-спектры регистрируются в диапазоне m/z от 40 до 1000. Характерные фрагменты ионов 259.012 ($C_6H_{11}SO_9^-$) и 96.960 (HSO_4^-) используются для подтверждения структуры GLS. Были изучены как «холоднопрессованный» рапс (CPR), так и «горячепрессованный» рапс (HPR). В случае холодного прессования, где активность мирозиназы сохранялась, наблюдался гидролиз GLS до ITC. Это позволило оценить динамику превращений GLS в процессе обработки и выявить факторы, влияющие на этот процесс. В случае горячего прессования, когда активность мирозиназы была подавлена высокими температурами, GLS оставались стабильными и ITC не образовывались.

ВЭЖХ с УФ-детектированием при длине волны 230 нм широко применяется в анализе GLS и их метаболитов ввиду высокой доступности метода и относительно высокой эффективности. Исследование, проведенное группой ученых из Университета Сиены и Центра науки о коллоидах и поверхностях (CSGI), было направлено на оптимизацию ВЭЖХ-УФ метода для оценки активности мирозиназы в экстрактах тканей брокколи и цветной капусты. Для этого были проведены эксперименты с использованием растворов с различной концентрацией GLS и разных условий инкубации. Результаты показали, что активность мирозиназы зависит от этих факторов. При высоких концентрациях субстратов наблюдалось снижение активности фермента, что может быть связано с насыщением активных центров мирозиназы или присутствием ингибиторов в растительных экстрактах. Было установлено, что оптимальный диапазон концентраций для измерения активности составляет до 400 мкМ для синигрина и до 1000 мкМ для глюкорафанина. Также была проведена оценка эффективности предложенного метода по сравнению с традиционным спектрофотометрическим методом. Оказалось, что ВЭЖХ с УФ-детектированием позволяет работать с более высокими концентрациями GLS и дает более воспроизводимые результаты. Это особенно важно при исследовании сложных систем, таких как растительные ткани, где могут присутствовать различные ингибиторы и кофакторы [82].

На основании анализа исследований, посвященных экстракции и анализу GLS, можно выделить ряд ключевых аспектов. Во-первых, наблюдается четкая зависимость между условиями термической обработки сырья и количественным содержанием GLS в полученных экстрактах. Важную роль в процессе экстракции

и подготовке образцов играет использование высоких температур, способствующих эффективному разрушению клеточных структур, что позволяет максимально высвободить GLS из растительного материала. Специфические растворители, такие как смеси этанола и воды или метанола и воды, помогают улучшить растворимость GLS и облегчить их последующий анализ. Наконец, для достижения наилучшего разделения и обнаружения целевых соединений необходима оптимизация условий хроматографии, включающая подбор подходящих колонок, градиентов элюента и рабочих параметров системы. Учет всех этих факторов способствует повышению чувствительности и селективности анализа, что особенно важно при работе со сложными смесями веществ. Одним из основных препятствий в анализе GLS и ITC является недостаток коммерчески доступных стандартных образцов высокого качества. Это затрудняет разработку и валидацию новых методик анализа, ограничивает возможности сравнения результатов разных лабораторий и снижает достоверность результатов. Еще одним актуальным направлением является необходимость разработки новых методик для изучения метаболизма и биодоступности GLS. Современные методы зачастую не позволяют полностью отслеживать пути превращения этих соединений в организме, что ограничивает понимание их потенциальных полезных свойств и возможных побочных эффектов.

Заключение

Анализ литературных данных показал, что GLS являются вторичными метаболитами, специфичными для растений порядка *Capparales,* а источниками их получения могут служить представители семейства *Brassicaceae*. Изучение данных клинических исследований и результаты экспериментов на животных показали, что перспективными видами биологической активности, в частности противоопухолевой и кардиопротекторной, обладают как сами GLS, так и их метаболиты – ITC, при этом важным является относительно низкая токсичность этих соединений. Эти свойства GLS и их метаболитов в свою очередь можно использовать в терапии нозологий, имеющих медико-социальную значимость. Литературные данные свидетельствуют, что в нашей стране исследования по изучению как химических свойств GLS, так и видов их активности практически не ведутся. Вместе с тем остается актуальным поиск доступных природных источников получения и разработки схем синтеза отечественных стандартных образцов GLS. Работы в этой области позволят проводить стандартизацию растительного сырья представителей семейства *Brassicaceae* по группе специфических БАС, а наличие отечественных стандартных образцов GLS решит одну из основных задач при разработке природных препаратов на основе GLS.

Финансирование
Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Пятигорского медико-фармацевтического института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

1. Abdel-Massih R.M., Debs E., Othman L., Attieh J., Cabrerizo F.M. Glucosinolates, a natural chemical arsenal: More to tell than the myrosinase story // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. Article 1130208. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1130208.
2. Съедин А.В. Фармакогностическое изучение рапса обыкновенного (*Brassica napus* L.): автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Пятигорск, 2014. 24 с.
3. Favela-González K.M., Hernández-Almanza A.Y., De la Fuente-Salcido N.M. The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (Brassica) as antimicrobials and antioxidants: A review // Journal of Food Biochemistry. 2020. Vol. 44, no. 10. Article e13414. https://doi.org/10.1111/jfbc.13414.
4. Grosser K., van Dam N.M. A straightforward method for glucosinolate extraction and analysis with high-pressure liquid chromatography (HPLC) // Journal of Visualized Experiments. 2017. Vol. 121. Article 55425.

5. Yang W. et al. Plant secondary metabolites-mediated plant defense against bacteria and fungi pathogens // Plant Physiology and Biochemistry. 2024. Article 109224. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109224.
6. Loitongbam A. et al. Differential regulation of glucosinolate-myrosinase mediated defense determines host-aphid interaction in Indian mustard Brassica juncea L // Molecular Biology Reports. 2024. Vol. 51, no. 1. 1079. https://doi.org/10.1007/s11033-024-10002-z.
7. Muntean D., Stefanu M.N., Cata A., Buda V., Danciu C., Banica R., Pop R., Licker M., Ienascu I.M.C. Symmetrical Antioxidant and Antibacterial Properties of Four Romanian Cruciferous Extracts // Symmetry. 2021. Vol. 13. Pp. 893–908. https://doi.org/10.3390/sym13050893.
8. Ienaşcu I.M.C., Căta A., Chis A.A., Ştefănuţ M.N., Sfîrloagă P., Rusu G., Frum A., Arseniu A.M., Morgovan C., Rus L.L., Dobrea C.M. Some Brassicaceae Extracts as Potential Antioxidants and Green Corrosion Inhibitors // Materials. 2023. Vol. 16, no. 8. Article 2967. https://doi.org/10.3390/ma16082967.
9. Clarke D.B. Glucosinolates, structures and analysis in food // Analytical Methods. 2010. Vol. 2, no. 4. Pp. 310–325.
10. Miklavčič Višnjevec A., Tamayo Tenorio A., Steenkjær Hastrup A.C., Hansen N.M.L., Peeters K., Schwarzkopf M. Glucosinolates and Isothiocyantes in Processed Rapeseed Determined by HPLC-DAD-qTOF // Plants. 2021. Vol. 10, no. 11. Article 2548. https://doi.org/10.3390/plants10112548.
11. Cartea M.E., Velasco P. Glucosinolates in Brassica foods: bioavailability in food and significance for human health // Phytochemistry Reviews. 2008. Vol. 7, no. 2. Pp. 213–229. https://doi.org/10.1007/s11101-007-9072-2.
12. Almushayti A.Y. et al. Current analytical methods for determination of glucosinolates in vegetables and human tissues // Journal of Chromatography A. 2021. Vol. 1643. Article 462060. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462060.
13. National Library of Medicine [Электронный ресурс]. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/.
14. International Union of Pure and Applied Chemistry [Электронный ресурс]. URL: https://iupac.org/.
15. Cai C., de Vos R.C.H., Qian H., Bucher J., Bonnema G. Metabolomic and Transcriptomic Profiles in Diverse Brassica oleracea Crops Provide Insights into the Genetic Regulation of Glucosinolate Profiles // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2024. Vol. 72, no. 28. Pp. 16032–16044. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c02932.
16. Bacchetti T., Campagna R., Sartini D., Cecati M., Morresi C., Bellachioma L., Martinelli E., Rocchetti G., Lucini L., Ferretti G., Emanuelli M.C. C. spinosa L. subsp. rupestris Phytochemical Profile and Effect on Oxidative Stress in Normal and Cancer Cells // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 19. Article 6488. https://doi.org/10.3390/molecules27196488.
17. Iwamoto Y., Saito S., Teramoto T., Maruyama-Nakashita A., Kakuta Y. Crystal structure of Arabidopsis thaliana sulfotransferase SOT16 involved in glucosinolate biosynthesis // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2023. Vol. 677. Pp. 149–154. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.08.020.
18. Iwamoto Y., Saito S., Teramoto T., Maruyama-Nakashita A., Kakuta Y. Crystal structure of Arabidopsis thaliana sulfotransferase SOT16 involved in glucosinolate biosynthesis // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2023. Vol. 677. Pp. 149–154. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.08.020.
19. Sønderby I.E., Geu-Flores F., Halkier B.A. Biosynthesis of glucosinolates – gene discovery and beyond // Trends in Plant Science. 2010. Vol. 15, no. 5. Pp. 283–290.
20. Fahey J.W., Zalcmann A.T., Talalay P. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants // Phytochemistry. 2001. Vol. 56, no. 1. Pp. 5–51.
21. Field B. et al. Glucosinolate and amino acid biosynthesis in Arabidopsis // Plant Physiology. 2004. Vol. 135, no. 2. Pp. 828–839.
22. Grubb C.D., Abel S. Glucosinolate metabolism and its control // Trends in Plant Science. 2006. Vol. 11, no. 2. Pp. 89–100.
23. Latxague C., Gardrat C., Coustille J.L., Viaud M.C., Rollin P. Identification of enzymatic degradation products from synthesized glucobrassicin by gas chromatography-mass spectrometry // Journal of Chromatography A. 1991. Vol. 586, no. 1. Pp. 166–170. https://doi.org/10.1016/0021-9673(91)80037-h.
24. Rollin P., Tatibouët A. Glucosinolates: The synthetic approach // Comptes Rendus Chimie. 2011. Vol. 14, no. 2-3. Pp. 194–210.
25. Cerniauskaite D., Rousseau J., Sackus A., Rollin P., Tatibouët A. Glucosinolate synthesis: A hydroxamic acid approach // European Journal of Organic Chemistry. 2011. Pp. 2293–2300.
26. Prieto M.A., López C.J., Simal-Gandara J. Glucosinolates: Molecular structure, breakdown, genetic, bioavailability, properties and healthy and adverse effects // Advances in Food and Nutrition Research. 2019. Vol. 90. Pp. 305–350. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.008.
27. Mitreiter S., Gigolashvili T. Regulation of glucosinolate biosynthesis // Journal of Experimental Botany. 2021. Vol. 72, no. 1. Pp. 70–91. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa479.
28. Liu Y., Rossi M., Liang X., Zhang H., Zou L., Ong C.N. An integrated metabolomics study of glucosinolate metabolism in different Brassicaceae genera // Metabolites. 2020. Vol. 10, no. 8. Article 313. https://doi.org/10.3390/metabo10080313.
29. Джабраилов Ю.М. Лекарственные растения: влияние факторов внешней среды на содержание вторичных метаболитов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №9. С. 108–112.
30. Chowdhury M., Kiraga S., Islam M.N., Ali M., Reza M.N., Lee W.-H., Chung S.-O. Effects of temperature, relative humidity, and carbon dioxide concentration on growth and glucosinolate content of kale grown in a plant factory // Foods. 2021. Vol. 10, no. 7. 1524. https://doi.org/10.3390/foods10071524.

31. Shirakawa M., Hara-Nishimura I. Specialized vacuoles of myrosin cells: Chemical defense strategy in Brassicales plants // Plant & Cell Physiology. 2018. Vol. 59, no. 7. Pp. 1309–1316. https://doi.org/10.1093/pcp/pcy082.
32. Ressurreição S., Salgueiro L., Figueirinha A. Diplotaxis genus: A promising source of compounds with nutritional and biological properties // Molecules. 2024. Vol. 29, no. 11. Article 2612. https://doi.org/10.3390/molecules29112612.
33. Ramezani R., Azadbakht L., Benisi-Kohansal S., Esmaillzadeh A., Milajerdi A. A case-control study on the association of fruit and vegetable consumption with risk of breast cancer // International Journal of Preventive Medicine. 2024. Vol. 15. Article 56. https://doi.org/10.4103/ijpvm.ijpvm_129_23.
34. Zhang G., Li Y., Sun Y. Cruciferous vegetables intake reduces pancreatic cancer risk: An updated systematic review with meta-analysis // European Journal of Nutrition. 2024. Vol. 63, no. 7. Pp. 2421–2435. https://doi.org/10.1007/s00394-024-03472-1.
35. Yu P., Yu L., Lu Y. Dietary consumption of cruciferous vegetables and bladder cancer risk: A systematic review and meta-analysis // Frontiers in Nutrition. 2022. Vol. 9. Article 944451. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.944451.
36. Flori L., Montanaro R., Pagnotta E., Ugolini L., Righetti L., Martelli A., Di Cesare Mannelli L., Ghelardini C., Brancaleone V., Testai L., Calderone V. Erucin exerts cardioprotective effects on ischemia/reperfusion injury through the modulation of mitoKATP channels // Biomedicines. 2023. Vol. 11, no. 12. Article 3281. https://doi.org/10.3390/biomedicines11123281.
37. Citi V., Corvino A., Fiorino F., Frecentese F., Magli E., Perissutti E., Santagada V., Brogi S., Flori L., Gorica E., Testai L., Martelli A., Calderone V., Caliendo G., Severino B. Structure-activity relationships study of isothiocyanates for H_2S releasing properties: 3-Pyridyl-isothiocyanate as a new promising cardioprotective agent // Journal of Advanced Research. 2020. Vol. 27. Pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.02.017.
38. Rathore A., Sharma A.K., Murti Y. et al. Medicinal plants in the treatment of myocardial infarction disease: A systematic review // Current Cardiology Reviews. 2024. Vol. 20, no. 4. Article e290424229484. https://doi.org/10.2174/157340303X278881240405044328.
39. Vega-Galvez A., Pasten A., Uribe E. et al. Comprehensive assessment of anti-inflammatory, antiproliferative and neuroprotective properties of cauliflower after dehydration by different drying methods // Foods. 2024. Vol. 13, no. 19. Article 3162. https://doi.org/10.3390/foods13193162.
40. Nguyen V.P.T., Stewart J., Lopez M., Ioannou I., Allais F. Glucosinolates: Natural occurrence, biosynthesis, accessibility, isolation, structures, and biological activities // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 19. Article 4537. https://doi.org/10.3390/molecules25194537.
41. Liu F., Bai Q., Tang W. et al. Antioxidants in neuropsychiatric disorder prevention: Neuroprotection, synaptic regulation, microglia modulation, and neurotrophic effects // Frontiers in Neuroscience. 2024. Vol. 18. Article 1505153. https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1505153.
42. Brokowska J., Herman-Antosiewicz A., Hać A. Isothiocyanates induce autophagy and inhibit protein synthesis in primary cells via modulation of AMPK-mTORC1-S6K1 signaling pathway, and protect against mutant huntingtin aggregation // European Journal of Nutrition. 2024. Vol. 64, no. 1. 46. https://doi.org/10.1007/s00394-024-03539-z.
43. Otoo R.A., Allen A.R. Sulforaphane's multifaceted potential: From neuroprotection to anticancer action // Molecules. 2023. Vol. 28, no. 19. Article 6902. https://doi.org/10.3390/molecules28196902.
44. Qu Y., Li X., Li J., Yu Z., Shen R. Combining network pharmacology and experimental verification to study the anticolon cancer effect and mechanism of sulforaphene // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024. Vol. 104, no. 14. Pp. 8769–8779. https://doi.org/10.1002/jsfa.13703
45. Tasnim F., Hosen M.E., Haque M.E., Islam A., Nuryay M.N., Mawya J., Akter N., Yesmin D., Hossain M.M., Rahman N., Mahmudul Hasan B.M., Hassan M.N., Islam M.M., Khalekuzzaman M. Glucosinolates and indole-3-carbinol from Brassica oleracea L. as inhibitors of E. coli CdtB: Insights from molecular docking, dynamics, DFT and in vitro assay // In Silico Pharmacology. 2024. Vol. 12, no. 2. Article 95. https://doi.org/10.1007/s40203-024-00276-3.
46. Sanchez-Guzman X., Alvarez-Dominguez L., Ramirez-Torres M.F., Montes-Alvarado J.B., Garcia-Ibanez P., Moreno D.A., Dominguez F., Maycotte P. Cruciferous plant extracts, their isothyocianate or indol derivatives, and their effect on cellular viability of breast cancer cell lines // Journal of Medicinal Food. 2024. https://doi.org/10.1089/jmf.2023.0199.
47. Mecca M., Sichetti M., Giuseffi M., Giglio E., Sabato C., Sanseverino F., Marino G. Synergic role of dietary bioactive compounds in breast cancer chemoprevention and combination therapies // Nutrients. 2024. Vol. 16, no. 12. Article 1883. https://doi.org/10.3390/nu16121883.
48. Liu P., Zhang B., Li Y., Yuan Q. Potential mechanisms of cancer prevention and treatment by sulforaphane, a natural small molecule compound of plant-derived // Molecular Medicine. 2024. Vol. 30, no. 1. Article 94. https://doi.org/10.1186/s10020-024-00842-7.
49. Harvey F., Aromokunola B., Montaut S., Yang G. The antioxidant properties of glucosinolates in cardiac cells are independent of H_2S signaling // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, no. 2. 696. https://doi.org/10.3390/ijms25020696.
50. Blažević I., Montaut S., Burčul F. et al. Glucosinolate structural diversity, identification, chemical synthesis and metabolism in plants // Phytochemistry. 2020. Vol. 169. Article 112100. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.112100.
51. Zhao Y., Zhang Y., Yang H., Xu Z., Li Z., Zhang Z., Zhang W., Deng J. A comparative metabolomics analysis of phytochemicals and antioxidant activity between broccoli floret and by-products (leaves and stalks) // Food Chemistry. 2024. Vol. 443. Article 138517. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138517.

52. Li S., Chen M., Wu H., Li Y., Tollefsbol T.O. Maternal epigenetic regulation contributes to prevention of estrogen receptor-negative mammary cancer with broccoli sprout consumption // Cancer Prevention Research. 2020. Vol. 13, no. 5. Pp. 449–462. https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-19-0491.
53. Quizhpe J., Ayuso P., Rosell M.L.Á., Peñalver R., Nieto G. Brassica oleracea var italica and their by-products as source of bioactive compounds and food applications in bakery products // Foods. 2024. Vol. 13, no. 21. Article 3513. https://doi.org/10.3390/foods13213513.
54. Chen L., Chan L.S., Lung H.L., Yip T.T.C., Ngan R.K.C., Wong J.W.C., Lo K.W., Ng W.T., Lee A.W.M., Tsao G.S.W., Lung M.L., Mak N.K. Crucifera sulforaphane (SFN) inhibits the growth of nasopharyngeal carcinoma through DNA methyltransferase 1 (DNMT1)/Wnt inhibitory factor 1 (WIF1) axis // Phytomedicine. 2019. Vol. 63. Article 153058. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.153058.
55. Coscueta E.R., Sousa A.S., Reis C.A., Pintado M.M. Phenylethyl isothiocyanate: A bioactive agent for gastrointestinal health // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 3. Article 794. https://doi.org/10.3390/molecules27030794.
56. Dinh T.N., Parat M.O., Ong Y.S., Khaw K.Y. Anticancer activities of dietary benzyl isothiocyanate: A comprehensive review // Pharmacological Research. 2021. Vol. 169. Article 105666. https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105666.
57. Nouchi R., Kawata N.Y.S., Saito T., Nouchi H., Kawashima R. Benefits of wasabi supplements with 6-MSITC (6-methylsulfinyl hexyl isothiocyanate) on memory functioning in healthy adults aged 60 years and older: Evidence from a double-blind randomized controlled trial // Nutrients. 2023. Vol. 15, no. 21. 4608. https://doi.org/10.3390/nu15214608.
58. Wu Y.Y., Xu Y.M., Lau A.T.Y. Anti-Cancer and Medicinal Potentials of Moringa Isothiocyanate // Molecules. 2021. Vol. 26(24). 7512. https://doi.org/10.3390/molecules26247512.
59. McAlpine P.L., Fernández J., Villar C.J., Lombó F. Organosulfur compounds in colorectal cancer prevention and progression // Nutrients. 2024. Vol. 16, no. 6. Article 802. https://doi.org/10.3390/nu16060802.
60. Connolly E.L., Sim M., Travica N. et al. Glucosinolates from cruciferous vegetables and their potential role in chronic disease: investigating the preclinical and clinical evidence // Frontiers in Pharmacology. 2021. Vol. 12. Article 767975. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767975.
61. Pernomian L., Blascke de Mello M.M., Parente J.M. et al. The hydrogen sulfide donor 4-carboxyphenyl-isothiocyanate decreases blood pressure and promotes cardioprotection through reduction of oxidative stress and NF-kappaB/MMP-2 axis in hypertension // Life Sciences. 2024. Vol. 351. 122819. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122819.
62. Citi V., Corvino A., Fiorino F. et al. Structure-activity relationships study of isothiocyanates for H_2S releasing properties: 3-Pyridyl-isothiocyanate as a new promising cardioprotective agent // Journal of Advanced Research. 2020. Vol. 27, no. 1. Pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.02.017.
63. Panahi Kokhdan E., Khodabandehloo H., Ghahremani H., Doustimotlagh A.H. A narrative review on therapeutic potentials of watercress in human disorders // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2021. Vol. 2021. Article 5516450. https://doi.org/10.1155/2021/5516450.
64. Das G., Tantengco O.A.G., Tundis R. et al. Glucosinolates and omega-3 fatty acids from mustard seeds: Phytochemistry and pharmacology // Plants. 2022. Vol. 11, no. 17. Article 2290. https://doi.org/10.3390/plants11172290.
65. Testai L., Pagnotta E., Piragine E. et al. Cardiovascular benefits of Eruca sativa mill. defatted seed meal extract: Potential role of hydrogen sulfide // Phytotherapy Research. 2022. Vol. 36, no. 6. Pp. 2616–2627. https://doi.org/10.1002/ptr.7479.
66. Kamal R.M., Abdull Razis A.F., Mohd Sukri N.S. et al. Beneficial health effects of glucosinolates-derived isothiocyanates on cardiovascular and neurodegenerative diseases // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 3. Article 624. https://doi.org/10.3390/molecules27030624.
67. Tarar A., Peng S., Cheema S., Peng C.A. Anticancer activity, mechanism, and delivery of allyl isothiocyanate // Bioengineering. 2022. Vol. 9, no. 9. 470. https://doi.org/10.3390/bioengineering9090470.
68. Hashimoto T., Yoshioka S., Iwanaga S., Kanazawa K. Anti-malarial activity of allyl isothiocyanate and N-acetyl-S-(N-allylthiocarbamoyl)-L-cysteine // Molecular Nutrition & Food Research. 2023. Vol. 67, no. 21. Article e2300185. https://doi.org/10.1002/mnfr.202300185.
69. Luo S., An R., Zhou H., Zhang Y., Ling J., Hu H., Li P. The glucosinolate profiles of Brassicaceae vegetables responded differently to quick-freezing and drying methods // Food Chemistry. 2022. Vol. 383. 132624. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132624.
70. Kyriakou S., Trafilis D.T., Deligiorgi M.V., Franco R., Pappa A., Panayiotidis M.I. Assessment of methodological pipelines for the determination of isothiocyanates derived from natural sources // Antioxidants. 2022. Vol. 11, no. 4. 642. https://doi.org/10.3390/antiox11040642.
71. Narra F., Piragine E., Benedetti G. et al. Impact of thermal processing on polyphenols, carotenoids, glucosinolates, and ascorbic acid in fruit and vegetables and their cardiovascular benefits // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. Vol. 23, no. 6. Article e13426. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13426.
72. Xu Q., Monagas M.J., Kassymbek Z.K., Belsky J.L. Controlling the quality of maca (*Lepidium meyenii*) dietary supplements: Development of compendial procedures for the determination of intact glucosinolates in maca root powder products // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2021. Vol. 199. 114063. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114063.
73. Kijkuokool P., Stepanov I., Ounjaijean S. et al. Effects of drying methods on the phytochemical contents, antioxidant properties, and anti-diabetic activity of Nasturtium officinale R.Br. (betong watercress) from southern Thailand // Life. 2024. Vol. 14, no. 9. Article 1204. https://doi.org/10.3390/life14091204.

74. Bojorquez-Rodriguez E.M., Guajardo-Flores D., Jacobo-Velázquez D.A., Serna-Saldívar S.O. Evaluation of the effects of process conditions on the extraction of glucosinolates from broccoli sprouts // Horticulturae. 2022. Vol. 8, no. 11. 1090. https://doi.org/10.3390/horticulturae8111090.
75. Đulović A., Burčul F., Čikeš Čulić V., Rollin P., Blažević I. Glucosinolates and cytotoxic activity of collard volatiles obtained using microwave-assisted extraction // Molecules. 2023. Vol. 28, no. 4. 1657. https://doi.org/10.3390/molecules28041657.
76. Pagliari S., Giustra C.M., Magoni C. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of naturally occurring glucosinolates from by-products of Camelina sativa L. and their effect on human colorectal cancer cell line // Front Nutr. 2022. Vol. 9. 901944. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.901944.
77. Ferreira S.S., Monteiro F., Passos C.P. et al. Blanching impact on pigments, glucosinolates, and phenolics of dehydrated broccoli by-products // Food Research International. 2020. Vol. 132. 109055. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109055.
78. Yu X., He H., Zhao X., Liu G., Hu L., Cheng B., Wang Y. Determination of 18 intact glucosinolates in brassicaceae vegetables by UHPLC-MS/MS: comparing tissue disruption methods for sample preparation // Molecules. 2021. Vol. 27, no. 1. Article 231. https://doi.org/10.3390/molecules27010231.
79. Manivannan A., Israni B., Luck K. et al. Identification of a sulfatase that detoxifies glucosinolates in the phloem-feeding insect Bemisia tabaci and prefers indolic glucosinolates // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. Article 671286. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671286.
80. Mocniak L.E., Elkin K.R., Dillard S.L., Bryant R.B., Söder K.J. Building comprehensive glucosinolate profiles for brassica varieties // Talanta. 2023. Vol. 251. 123814. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123814.
81. Miklavčič Višnjevec A., Tamayo Tenorio A., Steenkjær Hastrup A.C., Hansen N.M.L., Peeters K., Schwarzkopf M. Glucosinolates and isothiocyantes in processed rapeseed determined by HPLC-DAD-qTOF // Plants. 2021. Vol. 10, no. 11. 2548. https://doi.org/10.3390/plants10112548.
82. Pardini A., Tamasi G., De Rocco F. et al. Kinetics of glucosinolate hydrolysis by myrosinase in Brassicaceae tissues: A high-performance liquid chromatography approach // Food Chemistry. 2021. Vol. 355. 129634. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129634.

Поступила в редакцию 14 марта 2025 г.

После переработки 20 мая 2025 г.

Принята к публикации 9 октября 2025 г.

Nazlukhanyan M.A.[*]*, Kuregyan A.G., Pechinskiy S.V.* GLUCOSINOLATES: CHEMICAL CHARACTERISTICS AND BIOLOGICAL ACTIVITY (REVIEW)

Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education VolgSMU, ave. Kalinina, 11, Pyatigorsk, 357532, Russia, mikhail.nazlukhanyan@mail.ru

Currently, in the domestic scientific literature there is no structured information combining data on glucosinolates (CLS) as a class of biologically active compounds (BAC) that is promising for research. The article provides a systematic material on the chemical characteristics of CLS, which unite sulfur-containing glycosides of representatives of the cabbage family (Brassicaceae), chemical classification and possible pathways for chemical synthesis of CLS. The metabolism and biological activity of CLS are discussed separately. It is shown that under the action of myrosinase, active metabolites are formed, in particular, isothiocyanates (ITC), which are the main products of CLS hydrolysis. An analysis of literary data on the antitumor and cardioprotective activities of CLS and their metabolites is presented. In conclusion, some features of CLS extraction from natural sources and the main methods of their analysis are discussed. It is concluded that in the future, with the accumulation of sufficient experimental and theoretical material, this class of compounds can be considered as prodrugs for the treatment of nosologies with high medical and social significance.

Keywords: glucosinolates, cabbage, synthesis, biological activity, high performance liquid chromatography.

For citing: Nazlukhanyan M.A., Kuregyan A.G., Pechinskiy S.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 5–24. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260116985.

[*] Corresponding author.

References

1. Abdel-Massih R.M., Debs E., Othman L., Attieh J., Cabrerizo F.M. *Frontiers in Microbiology*, 2023, vol. 14, article 1130208. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1130208.
2. S"yedin A.V. *Farmakognosticheskoye izucheniye rapsa obyknovennogo (Brassica napus L.): avtoref. dis. ... kand. farm. nauk*. [Pharmacognostic study of common rape (Brassica napus L.): author's abstract. diss. ... candidate pharm. sciences]. Pyatigorsk, 2014, 24 p. (in Russ.).
3. Favela-González K.M., Hernández-Almanza A.Y., De la Fuente-Salcido N.M. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, vol. 44, no. 10, article e13414. https://doi.org/10.1111/jfbc.13414.
4. Grosser K., van Dam N.M. *Journal of Visualized Experiments*, 2017, vol. 121, article 55425.
5. Yang W. et al. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, article 109224. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109224.
6. Loitongbam A. et al. *Molecular Biology Reports*, 2024, vol. 51, no. 1, 1079. https://doi.org/10.1007/s11033-024-10002-z.
7. Muntean D., Stefanu M.N., Cata A., Buda V., Danciu C., Banica R., Pop R., Licker M., Ienascu I.M.C. *Symmetry*, 2021, vol. 13, pp. 893–908. https://doi.org/10.3390/sym13050893.
8. Ienaşcu I.M.C., Căta A., Chis A.A., Ştefănuţ M.N., Sfîrloagă P., Rusu G., Frum A., Arseniu A.M., Morgovan C., Rus L.L., Dobrea C.M. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 8, article 2967. https://doi.org/10.3390/ma16082967.
9. Clarke D.B. *Analytical Methods*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 310–325.
10. Miklavčič Višnjevec A., Tamayo Tenorio A., Steenkjær Hastrup A.C., Hansen N.M.L., Peeters K., Schwarzkopf M. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 11, article 2548. https://doi.org/10.3390/plants10112548.
11. Cartea M.E., Velasco P. *Phytochemistry Reviews*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 213–229. https://doi.org/10.1007/s11101-007-9072-2.
12. Almushayti A.Y. et al. *Journal of Chromatography A*, 2021, vol. 1643, article 462060. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462060.
13. *National Library of Medicine*. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/.
14. *International Union of Pure and Applied Chemistry*. URL: https://iupac.org/.
15. Cai C., de Vos R.C.H., Qian H., Bucher J., Bonnema G. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, vol. 72, no. 28, pp. 16032–16044. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c02932.
16. Bacchetti T., Campagna R., Sartini D., Cecati M., Morresi C., Bellachioma L., Martinelli E., Rocchetti G., Lucini L., Ferretti G., Emanuelli M.C. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 19, article 6488. https://doi.org/10.3390/molecules27196488.
17. Iwamoto Y., Saito S., Teramoto T., Maruyama-Nakashita A., Kakuta Y. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2023, vol. 677, pp. 149–154. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.08.020.
18. Iwamoto Y., Saito S., Teramoto T., Maruyama-Nakashita A., Kakuta Y. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2023, vol. 677, pp. 149–154. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.08.020.
19. Sønderby I.E., Geu-Flores F., Halkier B.A. *Trends in Plant Science*, 2010, vol. 15, no. 5, pp. 283–290.
20. Fahey J.W., Zalcmann A.T., Talalay P. *Phytochemistry*, 2001, vol. 56, no. 1, pp. 5–51.
21. Field B. et al. *Plant Physiology*, 2004, vol. 135, no. 2, pp. 828–839.
22. Grubb C.D., Abel S. *Trends in Plant Science*, 2006, vol. 11, no. 2, pp. 89–100.
23. Latxague C., Gardrat C., Coustille J.L., Viaud M.C., Rollin P. *Journal of Chromatography A*, 1991, vol. 586, no. 1, pp. 166–170. https://doi.org/10.1016/0021-9673(91)80037-h.
24. Rollin P., Tatibouët A. *Comptes Rendus Chimie*, 2011, vol. 14, no. 2-3, pp. 194–210.
25. Cerniauskaite D., Rousseau J., Sackus A., Rollin P., Tatibouët A. *European Journal of Organic Chemistry*, 2011, pp. 2293–2300.
26. Prieto M.A., López C.J., Simal-Gandara J. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2019, vol. 90, pp. 305–350. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.008.
27. Mitreiter S., Gigolashvili T. *Journal of Experimental Botany*, 2021, vol. 72, no. 1, pp. 70–91. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa479.
28. Liu Y., Rossi M., Liang X., Zhang H., Zou L., Ong C.N. *Metabolites*, 2020, vol. 10, no. 8, article 313. https://doi.org/10.3390/metabo10080313.
29. Dzhabrailov Yu.M. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2022, no. 9, pp. 108–112. (in Russ.).
30. Chowdhury M., Kiraga S., Islam M.N., Ali M., Reza M.N., Lee W.-H., Chung S.-O. *Foods*, 2021, vol. 10, no. 7, 1524. https://doi.org/10.3390/foods10071524.
31. Shirakawa M., Hara-Nishimura I. *Plant & Cell Physiology*, 2018, vol. 59, no. 7, pp. 1309–1316. https://doi.org/10.1093/pcp/pcy082.
32. Ressurreição S., Salgueiro L., Figueirinha A. *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 11, article 2612. https://doi.org/10.3390/molecules29112612.
33. Ramezani R., Azadbakht L., Benisi-Kohansal S., Esmaillzadeh A., Milajerdi A. *International Journal of Preventive Medicine*, 2024, vol. 15, article 56. https://doi.org/10.4103/ijpvm.ijpvm_129_23.
34. Zhang G., Li Y., Sun Y. *European Journal of Nutrition*, 2024, vol. 63, no. 7, pp. 2421–2435. https://doi.org/10.1007/s00394-024-03472-1.
35. Yu P., Yu L., Lu Y. *Frontiers in Nutrition*, 2022, vol. 9, article 944451. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.944451.

36. Flori L., Montanaro R., Pagnotta E., Ugolini L., Righetti L., Martelli A., Di Cesare Mannelli L., Ghelardini C., Brancaleone V., Testai L., Calderone V. *Biomedicines*, 2023, vol. 11, no. 12, article 3281. https://doi.org/10.3390/biomedicines11123281.
37. Citi V., Corvino A., Fiorino F., Frecentese F., Magli E., Perissutti E., Santagada V., Brogi S., Flori L., Gorica E., Testai L., Martelli A., Calderone V., Caliendo G., Severino B. *Journal of Advanced Research*, 2020, vol. 27, pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.02.017.
38. Rathore A., Sharma A.K., Murti Y. et al. *Current Cardiology Reviews*, 2024, vol. 20, no. 4, article e290424229484. https://doi.org/10.2174/157340303X278881240405044328.
39. Vega-Galvez A., Pasten A., Uribe E. et al. *Foods*, 2024, vol. 13, no. 19, article 3162. https://doi.org/10.3390/foods13193162.
40. Nguyen V.P.T., Stewart J., Lopez M., Ioannou I., Allais F. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 19, article 4537. https://doi.org/10.3390/molecules25194537.
41. Liu F., Bai Q., Tang W. et al. *Frontiers in Neuroscience*, 2024, vol. 18, article 1505153. https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1505153.
42. Brokowska J., Herman-Antosiewicz A., Hać A. *European Journal of Nutrition*, 2024, vol. 64, no. 1, 46. https://doi.org/10.1007/s00394-024-03539-z.
43. Otoo R.A., Allen A.R. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 19, article 6902. https://doi.org/10.3390/molecules28196902.
44. Qu Y., Li X., Li J., Yu Z., Shen R. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, vol. 104, no. 14, pp. 8769–8779. https://doi.org/10.1002/jsfa.13703
45. Tasnim F., Hosen M.E., Haque M.E., Islam A., Nuryay M.N., Mawya J., Akter N., Yesmin D., Hossain M.M., Rahman N., Mahmudul Hasan B.M., Hassan M.N., Islam M.M., Khalekuzzaman M. *In Silico Pharmacology*, 2024, vol. 12, no. 2, article 95. https://doi.org/10.1007/s40203-024-00276-3.
46. Sanchez-Guzman X., Alvarez-Dominguez L., Ramirez-Torres M.F., Montes-Alvarado J.B., Garcia-Ibanez P., Moreno D.A., Dominguez F., Maycotte P. *Journal of Medicinal Food*, 2024. https://doi.org/10.1089/jmf.2023.0199.
47. Mecca M., Sichetti M., Giuseffi M., Giglio E., Sabato C., Sanseverino F., Marino G. *Nutrients*, 2024, vol. 16, no. 12, article 1883. https://doi.org/10.3390/nu16121883.
48. Liu P., Zhang B., Li Y., Yuan Q. *Molecular Medicine*, 2024, vol. 30, no. 1, article 94. https://doi.org/10.1186/s10020-024-00842-7.
49. Harvey F., Aromokunola B., Montaut S., Yang G. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, vol. 25, no. 2, 696. https://doi.org/10.3390/ijms25020696.
50. Blažević I., Montaut S., Burčul F. et al. *Phytochemistry*, 2020, vol. 169, article 112100. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.112100.
51. Zhao Y., Zhang Y., Yang H., Xu Z., Li Z., Zhang Z., Zhang W., Deng J. *Food Chemistry*, 2024, vol. 443, article 138517. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138517.
52. Li S., Chen M., Wu H., Li Y., Tollefsbol T.O. *Cancer Prevention Research*, 2020, vol. 13, no. 5, pp. 449–462. https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-19-0491.
53. Quizhpe J., Ayuso P., Rosell M.L.Á., Peñalver R., Nieto G. *Foods*, 2024, vol. 13, no. 21, article 3513. https://doi.org/10.3390/foods13213513.
54. Chen L., Chan L.S., Lung H.L., Yip T.T.C., Ngan R.K.C., Wong J.W.C., Lo K.W., Ng W.T., Lee A.W.M., Tsao G.S.W., Lung M.L., Mak N.K. *Phytomedicine*, 2019, vol. 63, article 153058. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.153058.
55. Coscueta E.R., Sousa A.S., Reis C.A., Pintado M.M. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 3, article 794. https://doi.org/10.3390/molecules27030794.
56. Dinh T.N., Parat M.O., Ong Y.S., Khaw K.Y. *Pharmacological Research*, 2021, vol. 169, article 105666. https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105666.
57. Nouchi R., Kawata N.Y.S., Saito T., Nouchi H., Kawashima R. *Nutrients*, 2023, vol. 15, no. 21, 4608. https://doi.org/10.3390/nu15214608.
58. Wu Y.Y., Xu Y.M., Lau A.T.Y. *Molecules*, 2021, vol. 26(24), 7512. https://doi.org/10.3390/molecules26247512.
59. McAlpine P.L., Fernández J., Villar C.J., Lombó F. *Nutrients*, 2024, vol. 16, no. 6, article 802. https://doi.org/10.3390/nu16060802.
60. Connolly E.L., Sim M., Travica N. et al. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, vol. 12, article 767975. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767975.
61. Pernomian L., Blascke de Mello M.M., Parente J.M. et al. *Life Sciences*, 2024, vol. 351, 122819. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122819.
62. Citi V., Corvino A., Fiorino F. et al. *Journal of Advanced Research*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.02.017.
63. Panahi Kokhdan E., Khodabandehloo H., Ghahremani H., Doustimotlagh A.H. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, vol. 2021, article 5516450. https://doi.org/10.1155/2021/5516450.
64. Das G., Tantengco O.A.G., Tundis R. et al. *Plants*, 2022, vol. 11, no. 17, article 2290. https://doi.org/10.3390/plants11172290.
65. Testai L., Pagnotta E., Piragine E. et al. *Phytotherapy Research*, 2022, vol. 36, no. 6, pp. 2616–2627. https://doi.org/10.1002/ptr.7479.

66. Kamal R.M., Abdull Razis A.F., Mohd Sukri N.S. et al. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 3, article 624. https://doi.org/10.3390/molecules27030624.
67. Tarar A., Peng S., Cheema S., Peng C.A. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, no. 9, 470. https://doi.org/10.3390/bioengineering9090470.
68. Hashimoto T., Yoshioka S., Iwanaga S., Kanazawa K. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2023, vol. 67, no. 21, article e2300185. https://doi.org/10.1002/mnfr.202300185.
69. Luo S., An R., Zhou H., Zhang Y., Ling J., Hu H., Li P. *Food Chemistry*, 2022, vol. 383, 132624. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132624.
70. Kyriakou S., Trafilis D.T., Deligiorgi M.V., Franco R., Pappa A., Panayiotidis M.I. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, no. 4, 642. https://doi.org/10.3390/antiox11040642.
71. Narra F., Piragine E., Benedetti G. et al. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, vol. 23, no. 6, article e13426. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13426.
72. Xu Q., Monagas M.J., Kassymbek Z.K., Belsky J.L. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2021, vol. 199, 114063. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114063.
73. Kijkuokool P., Stepanov I., Ounjaijean S. et al. *Life*, 2024, vol. 14, no. 9, article 1204. https://doi.org/10.3390/life14091204.
74. Bojorquez-Rodriguez E.M., Guajardo-Flores D., Jacobo-Velázquez D.A., Serna-Saldívar S.O. *Horticulturae*, 2022, vol. 8, no. 11, 1090. https://doi.org/10.3390/horticulturae8111090.
75. Đulović A., Burčul F., Čikeš Čulić V., Rollin P., Blažević I. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 4, 1657. https://doi.org/10.3390/molecules28041657.
76. Pagliari S., Giustra C.M., Magoni C. et al. *Front Nutr*., 2022, vol. 9, 901944. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.901944.
77. Ferreira S.S., Monteiro F., Passos C.P. et al. *Food Research International*, 2020, vol. 132, 109055. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109055.
78. Yu X., He H., Zhao X., Liu G., Hu L., Cheng B., Wang Y. *Molecules*, 2021, vol. 27, no. 1, article 231. https://doi.org/10.3390/molecules27010231.
79. Manivannan A., Israni B., Luck K. et al. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 12, article 671286. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671286.
80. Mocniak L.E., Elkin K.R., Dillard S.L., Bryant R.B., Söder K.J. *Talanta*, 2023, vol. 251, 123814. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123814.
81. Miklavčič Višnjevec A., Tamayo Tenorio A., Steenkjær Hastrup A.C., Hansen N.M.L., Peeters K., Schwarzkopf M. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 11, 2548. https://doi.org/10.3390/plants10112548.
82. Pardini A., Tamasi G., De Rocco F. et al. *Food Chemistry*, 2021, vol. 355, 129634. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129634.

Received March 14, 2025

Revised May 20, 2025

Accepted October 9, 2025

Сведения об авторах

Назлуханян Михаил Артемович – аспирант, al.tishinatishina@yandex.ru

Курегян Анна Гургеновна – доктор фармацевтических наук, профессор кафедры фармацевтической химии, Kooreguan@mail.ru

Печинский Станислав Витальевич – кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры фармацевтической химии, hplc@yandex.ru

Information about authors

Nazlukhanyan Mikhail Artemovich – postgraduate student, al.tishinatishina@yandex.ru

Kuregyan Anna Gurgenovna – Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor in the Department of Pharmaceutical Chemistry, Kooreguan@mail.ru

Pechinsky Stanislav Vitalyevich – Candidate of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor in the Department of Pharmaceutical Chemistry, hplc@yandex.ru