Химия растительного сырья. 2026. №3. С. 290–299.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 3, pp. 290–299.
DOI: 10.14258/jcprm.20260317414

УДК 616-003.725:582.663

АМАРАНТ КАК ИСТОЧНИК БИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ: ОЦЕНКА АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТОВ АМАРАНТА, ПОЛУЧЕННЫХ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ЭКСТРАКЦИЕЙ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

© ***О.В. Салищева[1]*, А.А. Петрова[1], Т.В. Котова[2,3], В.П. Юстратов[1]***

[1] Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово, 650000, Россия, salishchevaov@mail.ru
[2] Кемеровский государственный медицинский университет, ул. Ворошилова, 22а, Кемерово, 650056, Россия
[3] Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта, 62, Екатеринбург, 620144, Россия

Уникальный состав липофильных соединений, наличие сквалена, каротиноидов, токоферолов, ненасыщенных жирных кислот в составе CO_2-экстрактов семян амаранта обеспечивает его высокую антиоксидантную активность. Цель исследования заключалась в определении антиоксидантной активности CO_2-экстрактов семян амаранта. В результате сверхкритической CO_2-экстракции из различных сепараторов были получены разные фракции масла амаранта. Оценивали влияние на антиоксидантные свойства экстрактов условий процесса CO_2-экстракции, включая условия сепарирования масла, а также влияние условий хранения масла амаранта. Антиоксидантную активность определяли с помощью анализа способности экстрактов поглощать радикалы DPPH и по способности ингибировать процесс окисления олеиновой кислоты. Наилучшую антиоксидантную активность показал экстракт, полученный при условиях: самое меньшее давление на выходе из сепаратора (45 атм) и самое большее время экстракции (240–330 мин). Данный экстракт содержит большее количество сквалена и ненасыщенных жирных кислот. Меньшую активность показал экстракт, полученный при самом высоком давлении (70 атм) и меньшем времени выдержки (0–120 мин). В данных условиях экстрагируется меньше сопутствующих биологически активных компонентов, включая сквален, изменяется соотношение содержания ненасыщенных жирных кислот к насыщенным. Результаты показали снижение антиоксидантной активности экстракта амаранта на 3,8% при хранении на свету в течение двух месяцев. Результаты исследований представляют ценность для оценки потенциальных источников антиоксидантных соединений, влияния условий экстракции и времени хранения экстрактов на антиоксидантные свойства, а также с целью получения функциональных продуктов, обогащенных биологически активными соединениями.

Ключевые слова: амарант, сверхкритическая CO_2 экстракция, биоантиоксиданты, антиоксидантная активность.

Для цитирования: Салищева О.В., Петрова А.А., Котова Т.В., Юстратов В.П. Амарант как источник биоактивных веществ: оценка антиоксидантной активности экстрактов амаранта, полученных сверхкритической экстракцией диоксидом углерода // Химия растительного сырья. 2026. №3. С. 290–299. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260317414.

Введение

В современном мире наблюдается повышенное внимание к содержанию антиоксидантных веществ в растительном сырье с целью создания биологически активных добавок или внесения биоактивных веществ в продукты питания. Антиоксиданты представляют собой класс биологически активных соединений, способных нейтрализовывать свободные радикалы, предотвращать окисление липидов, а также образование нежелательных продуктов окисления. В организме имеется собственная система борьбы с излишним количеством свободных радикалов, но она ослабляется под воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды. Неправильное питание, стрессы и другие факторы негативно влияют на антиоксидантную систему организма. Употребление в пищу «правильных» продуктов может восстанавливать антиоксидантную

* Автор, с которым следует вести переписку.

систему и значительно улучшать общее состояние организма: самочувствие, настроение и многое другое, поэтому исследовательское сообщество, как в Российской Федерации, так и за ее пределами, уделяет значительное внимание изучению антиоксидантов природного происхождения. Такая тенденция обусловлена не только способностью антиоксидантов противодействовать вредному воздействию избытка свободных радикалов и связанных с ними патологий, но и восприятием потребителями натуральных антиоксидантов как более безопасных и благоприятных для здоровья, в сравнении с синтетическими аналогами.

Амарант (*Amaranthus*) рассматривается как многообещающая альтернатива традиционным зерновым культурам. В отличие от большинства традиционных зерновых культур, амарант характеризуется сбалансированным аминокислотным составом, включающим все незаменимые аминокислоты, отсутствием глютена в зерне и высоким содержанием пищевых волокон, антиоксидантов (полифенолов, сквалена, α-токоферола), макро- и микроэлементов (железа, кальция, магния, цинка), фитохимических соединений и биоактивных пептидов [1–3].

На рисунке 1 представлена подробная схема химического состава зерна амаранта, на которой выделены основные группы питательных веществ и биологически активные соединения [4]. На иллюстрации четко показаны белковые, липидные, углеводные, витаминные и минеральные компоненты, а также широкий спектр биологически активных веществ, таких как фенольные соединения, флавоноиды и сквален.

Антиоксидантные свойства амаранта можно объяснить наличием таких соединений, как фитостеролы, полифенолы, витамины, сквален и биоактивные пептиды [5, 6]. К фенольным соединениям относятся фенольные кислоты, флавоноиды и дубильные вещества, которые оказывают широкий спектр физиологических воздействий на растение, особенно связанных с защитой от ультрафиолетового излучения, патогенов и травоядных животных [7]. Полифенолы обладают противовоспалительными, противомикробными, сердечнососудистыми и антиканцерогенными свойствами, поскольку они действуют как доноры и акцепторы электронов, нейтрализуя пероксиды и гидропероксиды, а также активируя и деактивируя металлы [8]. В амаранте были обнаружены фенольные соединения, такие как галловая, ванилиновая, феруловая кислоты и их производные, а также флавоноиды, такие как кемпферол, кверцетин, рутин и их гликозиды и танины, которые в основном обладают антиоксидантными, противовоспалительными, противодиабетическими и противораковыми свойствами [9–11]. Вышеупомянутые соединения могут быть важны для разработки функциональных продуктов питания, улучшающих здоровье человека [12].

Исследование [13] выявило несколько фенольных соединений, в том числе флавоноиды, такие как кверцетин, изокверцетин и кемпферол, а также фенольные кислоты, такие как *п*-кумаровая кислота и 4-гидроксибензойная кислота [14]. Связанные феруловые кислоты, такие как *транс*-феруловая кислота (620 мг/кг) и *цис*-феруловая кислота (203 мг/кг), были обнаружены в семенах амаранта после щелочного и ферментативного гидролиза [15]. По сравнению с другими фенольными кислотами, обнаруженными в семенах *A. viridis*, феруловая кислота (11.46 мг/100 г) и п-гидроксибензойная кислота (10.92 мг/100 г) содержались в наибольших количествах [16]. Кроме того, были обнаружены ванилиновая, кофейная, синаповая и коричная кислоты, но в меньших концентрациях.

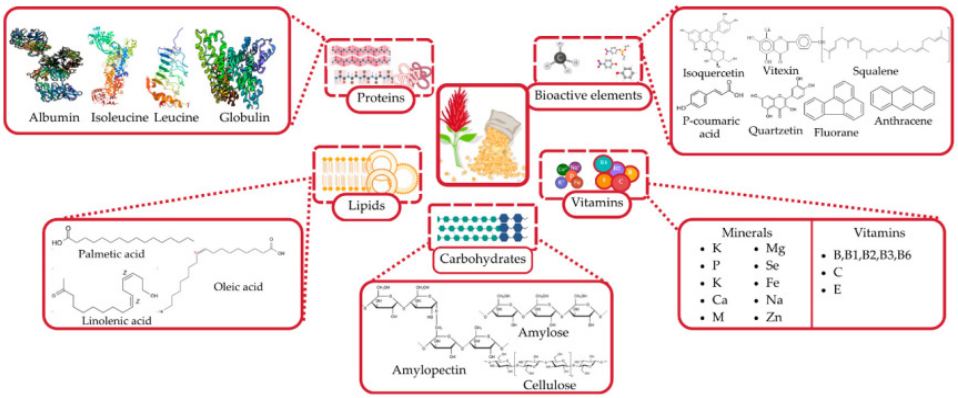


Рис. 1. Химический состав и биологически активные соединения зерна амаранта. Цитируется из [4], опубликовано под лицензией открытого доступа Creative Commons CC BY license

Липидная фракция семян амаранта содержит до 11% сквалена, ключевого предшественника тритерпенов и стероидов, в том числе стеролов и их производных, которые используются для лечения атеросклероза [17]. Амарант является одним из богатейших растительных источников сквалена. Сквален оказывает значительное кардиопротекторное действие, снижая уровень холестерина липопротеинов низкой плотности и триглицеридов, а также обладает мощными антиоксидантными и противовоспалительными свойствами [18]. Кроме того, он поддерживает правильный обмен веществ, снижая уровень глюкозы в крови и триглицеридов в печени, стимулируя выработку инсулина [19].

В [20] отмечено наличие несколько насыщенных (13) и ненасыщенных (10) углеводородов с одной двойной связью (C21–C33) в экстракте *A. Cruentus* с концентрациями в диапазоне от 1.91 до 64.9 частей на миллион. Общее содержание полициклических ароматических углеводородов в амарантовом масле холодного отжима составило 101.6 мг/кг, при этом наиболее значимыми были фенантрен, антрацен, флуорен и пирен.

Масло амаранта содержит примерно 20% свободных стеролов, при этом 80% стеролов являются этерифицированными [20]. В масле *A. Cruentus* было обнаружено 15 стеролов, наиболее важными из которых являются 24-метилхолестерин, кампестерин, стигмастерин, D7-кампестерин, клеростерин, β-ситостерин, D5-авенастерин, D7-стигмастерин и D5-авенастерин.

Семена амаранта также содержат каротиноиды, такие как лютеин (0.355–0.444 мг/100 г) и зеаксантин (0.014–0.030 мг/100 г), которые являются незаменимыми питательными веществами, не синтезируемыми организмом человека [21].

Таким образом, амарант представляет собой многообещающий источник биоактивных антиоксидантов, которые можно использовать при разработке функциональных пищевых продуктов [22].

Антиоксидантную способность можно количественно оценить с использованием различных методов, каждый из которых имеет свой специфический механизм действия: перенос атома водорода, перенос одного электрона, целенаправленное поглощение активных форм кислорода (АФК) и другие. Эти методы различаются по способу действия антиоксиданта, типу субстрата, инициатору окисления, достигаемому эффекту и простоте использования [23]. Методы исследования общей антиоксидантной активности различаются по типу источника окисления, окисляемого соединения и способа измерения окисленного соединения. Эти методы дают широкий набор результатов, которые нельзя использовать по отдельности, – они должны быть интерпретированы с осторожностью. Сравнительные исследования антиоксидантных анализов убедительно доказывают, что различные общепринятые методы значительно отличаются друг от друга, поэтому антиоксидантную активность следует проверять с помощью нескольких методов. Так, авторы [24] указывают на такие методы: анализ DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразилгидрата), анализ FRAP (ферритин-восстанавливающая антиоксидантная способность), анализ H_2O_2 (активность пероксида водорода по связыванию свободных радикалов) – как надежные, простые и недорогие.

Авторами [25] отмечено, что DPPH в основном используется для тестирования антиоксидантной активности in vitro, в то время как перекисное окисление липидов используется *in vivo*.

Метод DPPH [26] не является специфичным для какого-то одного антиоксиданта, поэтому с его помощью можно определить общую антиоксидантную способность образца.

Метод FRAP, основанный на процессе восстановления железа (II) полифенолами в присутствии лигандов R, дающих окрашенные комплексы с ионами Fe(2+) [27], имеет некоторые ограничения, поскольку в окислительно-восстановительную реакцию с ионами железа могут вступать не только вещества, проявляющие антиоксидантные свойства. С помощью FRAP трудно определять липофильные антиоксидантные вещества, он не позволяет обнаружить инертные фенольные соединения и тиолы. Тем не менее метод FRAP является недорогим, чувствительным и воспроизводимым, а также совместим с широким спектром биологических материалов.

Определение антиоксидантной активности *с помощью ABTS* широко применяется для оценки антиоксидантной активности различных веществ, тест напрямую связан с активность экстрактов удалять радикалы, и соответственно, ингибировать окислительные процессы [28].

В методах, основанных на способности ингибировать образование ТБК-активных продуктов (TBARP), за интенсивностью окислительного процесса следят по накоплению тиобарбитуровой кислоты (ТБК) [29], образующей с малоновым диальдегидом (МДА, продуктом распада в реакции Фентона) окрашенный в розовый цвет комплекс [30]. Описан модифицированный метод аскорбатзависимого окисления, основанный на способности к окислению кислородом воздуха в разбавленных водных растворах остатков

олеиновой кислоты в присутствии кофакторов окисления – ионов железа (II) и аскорбиновой кислоты. Антиоксидантную активность оценивают по степени уменьшения концентрации комплекса МДА (продукта окисления) с ТБК по сравнению с контролем [29].

Цель настоящего исследования – определение антиоксидантной активности CO_2-экстрактов семян амаранта.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являются пищевые семена растения рода Amaranthus, сорта «Кинес», отечественной селекции, Курская область, Крестьянское (фермерское) хозяйство Гандзюк А.П., ТУ 01.11.99-001-0086728806-2019, семейство амарантовых род Amaranthus вид hypochondriacus L.

Перед экстракцией проведена подготовка сырья. Предварительная обработка семян амаранта включала очистку от примесей, измельчение в жерновой мельнице. Экстракция проводилась на установке CO_2-экстракции «ЭЗТ-10/2-1/1-3-ВА» (производитель ООО «ЦНР», Россия), представленной на рисунке 2.

В результате сверхкритической CO_2-экстракции из различных сепараторов были получены разные фракции масла семян амаранта [31].

Условия получения образцов.

Образцы экстрактов для исследования антиоксидантной активности получены при следующих параметрах (давление, температура и время экстракции):

1 образец – давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 1 (S1) – давление 70 атм, температура 35 °С, время экстрагирования 0–120 мин.

2 образец – давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 1 (S1) – давление 70 атм, 35 °С, время экстрагирования 120–240 мин.

3 образец – давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 2 (S2) – давление 60 атм, 35 °С, время экстрагирования 120–240 мин.

4 образец – давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 2 (S2) – давление 50 атм, 35 °С, время экстрагирования 240–330 мин.

5 образец – давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 3 (S3) – давление 45 атм, 35 °С, время экстрагирования 240–330 мин.

Определение антиокислительной активности образцов по задержке окисления олеиновой кислоты.

В опытные пробирки, содержащие по 400 мкл олеиновой кислоты, последовательно вносили по 200 мкл исследуемых образцов, 0.8 мМ аскорбиновой кислоты, и 1×10^{-5} свежеприготовленного раствора $FeSO_4$. После добавления ионов железа (II) пробы инкубировали при 37 °С в течение 40 мин в термостате при постоянном перемешивании с использованием ротатора. После окончания инкубации к пробам добавляли 200 мкл ортофосфорной кислоты и 1.5 мл 0.8% раствора ТБК. Смесь нагревали на водяной бане в течение 25 мин. После этого добавляли 2 мл воды бидистиллированной и 3 мл *н*-бутанола. Тщательно перемешав содержимое пробирок, систему подвергали центрифугированию при 3000 об./мин в течение 10 мин. Органическую фазу подвергали спектрофотометрированию на СФ-2000 (ОКБ Спектр, Россия) в кварцевых кюветах 1×1 см при 532 нм [30].



Рис. 2. Установка сверхкритической CO_2-экстракции «ЭЗТ-10/2-1/1-3-ВА»

Расчет антиоксидантной активности (АОА) осуществляли по формуле (где ОПк – оптическая плотность контрольного образца, ОПоб – оптическая плотность исследуемого образца):

$$АОА = \frac{ОПк - ОПоб}{ОПк} \cdot 100\% \cdot$$

В качестве образца сравнения (стандарта антиоксидантной активности) использовали раствор α-токоферола (Zentiva, Чехия) в количестве 0.2 мл. Образцом сравнения служила пробирка (№1) с окисляемым субстратом без добавления антиоксиданта. Кювета сравнения содержала раствор ТБК, аскорбиновой кислоты и сульфата железа (II).

Исследования проводили на базе научно-исследовательской лаборатории Единого лабораторного комплекса Уральского государственного экономического университета (НИЛ ЕЛК ФГБОУ ВО «УрГЭУ»).

Оценка антиоксидантной активности с помощью DPPH-радикалов [26].

Образцы экстрактов для исследования антиоксидантной активности с использованием DPPH получены при следующих параметрах (давление, температура и время экстракции):

Образец 1: давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 1 (S1) – давление 70 атм, температура 35 °С, время экстрагирования 0–120 мин. Образец 1 дополнительно хранился в течение 2-х месяцев на свету температуре 25±5 °С.

Образец 5: давление в рабочей колонке 100 атм, сепаратор 3 (S3) – давление 45 атм, температура 35 °С, время экстрагирования 240–330 мин. При этом образец 5 также дополнительно хранился в течение 2 месяцев на свету температуре 25±5 °С.

Для определения антиоксидантной активности исследуемые образцы смешивали с раствором 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилгидрата (DPPH) (0.079 г сухого реактива DPPH растворяли в 1 л 96% этилового спирта) в соотношении 1 : 3, перемешивали и оставляли на 30 мин в темном месте. Далее полученные растворы центрифугировали в течение 5 мин при скорости вращения 7500 об./мин. В качестве положительного контроля использовали 1 М раствор аскорбиновой кислоты. Далее смешивали с раствором DPPH в соотношении 1 : 3, перемешивали и оставляли на 30 мин в темном месте. Определение оптической плотности полученных образцов (ОПоб) осуществляли при длине волны 517 нм на спектрофотометре в кюветах толщиной 10 мм. Исследование проводили в трехкратной повторности на спектрофотометре двухлучевом UV-1800 (Shimadzu), Япония. В качестве контроля использовали раствор DPPH (ОПк). Расчет антиоксидантной активности (АОА) осуществляли по формуле:

$$АОА = \left(1 - \frac{ОПоб}{ОПк}\right) \cdot 100\%$$

Результаты представлены с использованием среднего значения величины АОА и средней величины ошибки.

Обсуждение результатов

Исследование антиоксидантной активности проводили по задержке процесса окисления олеиновой кислоты. В основе метода лежит реакция между малоновым диальдегидом (МДА) и тиобарбитуровой кислотой (ТБК), которая в кислой среде приводит к формированию триметинового комплекса, содержащего одну молекулу МДА и две молекулы ТБК с максимумом поглощения при 532 нм. Результаты исследования CO_2-экстрактов представлены в таблице 1.

Известно, что сверхкритическая CO_2 экстракция имеет два периода: быстрый и короткий период, в ходе которого извлекается основное количество липофильных веществ, находящихся на поверхности сырья, и медленный – более длительный, когда извлекается оставшееся количество вещества, содержащихся в микрокапиллярах и внутри неразрушенных клеток [32].

CO_2 экстракты семян амаранта содержат: парафиновые углеводороды, сквален, сложные эфиры жирных кислот (ЖК) с фитостеролами и жирными спиртами, триацилглицерины, токоферолы, свободные ЖК, свободные фитостеролы, каротиноиды. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии установлен

жирнокислотный состав экстрактов и содержание сквалена. На рисунке 3 представлена динамика изменения содержания ненасыщенных жирных кислот и скалена в CO_2-экстрактах исследуемых образцов.

Содержание сквалена в масле колеблется от 5.4 до 16.7%. При повышении давления увеличивается выход масла [31], снижается содержание в экстракте сквалена, но одновременно с этим экстрагируется больше сопутствующих биологически активных компонентов, изменяется соотношение содержания ненасыщенных жирных кислот к насыщенным.

Наилучшую антиоксидантную активность показал образец №5, превосходящий по антиоксидантной активности в эквивалентных объемах стандарт антиоксиданта α-токоферол. Экстракт, полученный при указанных условиях, а именно самое меньшее давление на выходе из сепаратора и самое большее время экстракции, содержит большее количество сквалена и ненасыщенных жирных кислот. Далее по убывающей активности образцы: №2, №4, №3, причем антиоксидантная активность данных экстрактов составила в среднем 60%. И меньшую активность относительно всех исследуемых систем показал образец №1 – экстракт, полученный при самом высоком давлении и меньшем времени выдержки.

Антиоксидантная способность, определяемая с помощью анализа способности поглощать радикалы DPPH.

Для анализа антиоксидантной активности были взяты образцы большим и меньшим временем выдержки, это образец 1 и образец 5.

Анализ стабильного 1,1-дифенил-2-пикрилгидразил-радикала (DPPH) использован для оценки способности антиоксидантов поглощать стабильный радикал DPPH•. В случае проявления антиоксидантной способности экстракта при взаимодействии исследуемых веществ с DPPH наблюдается снижение содержания свободных радикалов DPPH• в системе [33]. Поскольку концентрация DPPH уменьшается на количество антиоксидантов, присутствующих в образце, по ослаблению окраски исследуемого раствора можно судить о содержании антиоксидантов в экстрактах. В ходе данного исследования оценивали влияние времени и условий хранения на антиоксидантные свойства масла амаранта. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 1. Результаты исследования антиоксидантной активности экстрактов

№	Исследуемая система	АОА, %
1	Образец контроля: субстрат окисления без антиоксидантов	–
2	1 образец	48.43±0.10
3	2 образец	64.80±0.21
4	3 образец	59.73±0.26
5	4 образец	61.41±0.11
6	5 образец	90.30±0.32
7	Образец контроля: субстрат окисления с антиоксидантом α-токоферолом	88.46±0.24

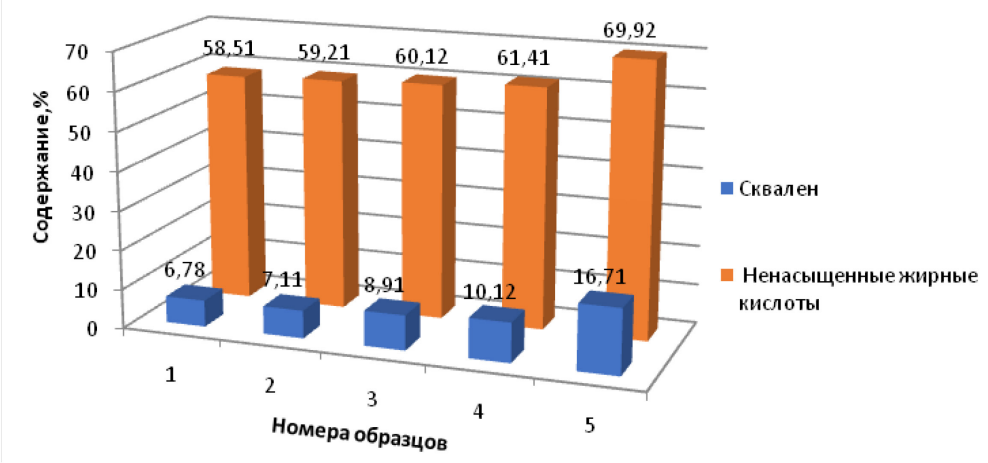


Рис. 3. Содержание ненасыщенных жирных кислот и сквалена в CO_2-экстрактах семян амаранта

Таблица 2. Антиоксидантная активность CO_2-экстрактов семян амаранта

Вид экстракта	Условия хранения	Антиоксидантная активность (АОА), %
Образец 1	без хранения	53.33±0.08
	в течение 2 месяцев на свету при температуре 25±5 °C	49.52±0.07
Образец 5	без хранения	85.23±0.06
	в течение 2 месяцев на свету при температуре 25±5 °C	81.43±0.05

Результаты показали снижение антиоксидантной активности экстракта амаранта на 3.8% при хранении. Причем даже несмотря на то, что данный образец проявил меньшую по сравнению с α-токоферолом антиоксидантную активность, сверхкритическая флюидная экстракция способствует получению масла амаранта с большим содержанием биоактивных компонентов. Так, в работе [34] была исследована антиоксидантная активность различных частей растения амаранта по способности поглощать свободные радикалы и по способности восстанавливать ионы железа, антиоксидантная способность экстрактов семян амаранта, измеренная с помощью анализов DPPH и FRAP, в сравнении с витамином Е составила 28.4±1.3 и 55.3±1.6 соответственно. В работе [35] с помощью анализа DPPH был изучен антиоксидантный потенциал масла, полученного из семян амаранта простым методом мацерации трехступенчатой последовательной экстракцией циклогексаном с последующим центрифугированием и отделением органического растворителя. В качестве контроля процесса ингибирования DPPH была взята аскорбиновая кислота. Жировые фракции, экстрагированные циклогексаном, содержащие от 5.3 до 7.7% скалена, показали очень низкую антиоксидантную активность по сравнению с аскорбиновой кислотой (44.5%).

Заключение

Уникальный состав липофильных соединений, наличие сквалена, каротиноидов, токоферолов и ненасыщенных жирных кислот в составе CO_2-экстрактов семян амаранта обеспечивает его высокую антиоксидантную активность. Результаты исследований представляют ценность для оценки потенциальных источников антиоксидантных соединений, влияния условий экстракции и времени хранения экстрактов на антиоксидантные свойства, а также с целью получения функциональных продуктов, обогащенных биологически активными соединениями. Биоактивные компоненты амаранта являются одними из ключевых соединений, определяющих их биологические эффекты и значительную потенциальную пользу для здоровья человека, заключающуюся в способности защищать компоненты клеток от окислительного повреждения и, следовательно, ограничивать риск различных дегенеративных заболеваний, связанных с окислительным стрессом, таких как рак, сердечнососудистые заболевания и другие.

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-16-00113.

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

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Martinez-Lopez A., Millan-Linares M.C., Rodriguez-Martin N.M., Millan F., Montserrat-de la Paz S. Nutraceutical value of kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) // J. Funct. Foods. 2020. Vol. 65. 103735. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103735.
2. Balakrishnan G., Schneider R.G. The role of amaranth, quinoa, and millets for the development of healthy, sustainable food products – A concise review // Foods. 2022. Vol. 11. 2442. https://doi.org/10.3390/foods11162442.
3. Rodríguez M., Tironi V.A. Polyphenols in amaranth (*A. manteggazianus*) flour and protein isolate: Interaction with other components and effect of the gastrointestinal digestion // Food Res. Int. 2020. Vol. 137. 109524. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109524.
4. Toimbayeva D., Saduakhasova S., Kamanova S. et al. Prospects for the Use of Amaranth Grain in the Production of Functional and Specialized Food Products // Foods. 2025. Vol. 14(9). 1603. https://doi.org/10.3390/foods14091603.

5. Karamac M., Gai F., Longato E., Meineri G., Janiak M.A., Amarowicz R., Peiretti P.G. Antioxidant Activity and Phenolic Composition of Amaranth (*Amaranthus caudatus*) during plant growth // Antioxidants. 2019. Vol. 8. 173. https://doi.org/10.3390/antiox8060173.
6. Sharma G., Lakhawat S. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa*), an ancient Andean grain: A review // J. Pharmacogn. Phytochem. 2017. Vol. 6. Pp. 1488–1489.
7. Adetunji C.O., Michael O.S., Varm A. et al. Recent advances in the application of biotechnology for improving the production of secondary metabolites from quinoa // Biology and Biotechnology of Quinoa: Super Grain for Food Security. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. Pp. 373–396. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3832-9_17.
8. Bertelli A., Biagi M., Corsini M., Baini G., Cappellucci G., Miraldi E. Polyphenols: From theory to practice // Foods. 2021. Vol. 10. 2595. https://doi.org/10.3390/foods10112595.
9. Alvarez-Jubete L., Wijngaard H., Arendt E.K., Gallagher E. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking // Food Chem. 2010. Vol. 119. Pp. 770–778. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032.
10. Tang Y., Tsao R. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: A review // Mol. Nutr. Food Res. 2017. Vol. 61. 1600767.
11. Schröter D., Neugart S., Schreiner M., Grune T., Rohn S., Ott C. Amaranth's 2-caffeoylisocitric acid an anti-inflammatory caffeic acid derivative that impairs NF-κB signaling in LPS-challenged RAW 264.7 macrophages // Nutrients. 2019. Vol. 11. 571.
12. Zhu F. Proanthocyanidins in cereals and pseudocereals // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2019. Vol. 59. Pp. 1521–1533.
13. Rodríguez M., Tironi V.A. Polyphenols in amaranth (*A. manteggazianus*) flour and protein isolate: Interaction with other components and effect of the gastrointestinal digestion // Food Res. Int. 2020. Vol. 137. 109524
14. Klimczak I., Małecka M., Pachołek B. Antioxidant activity of ethanolic extracts of amaranth seeds // Food Nahr. 2002. Vol. 46. Pp. 184–186.
15. Bunzel M., Ralph J., Steinhart H. Association of non-starch polysaccharides and ferulic acid in grain amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) dietary fiber // Mol. Nutr. Food Res. 2005. Vol. 49. Pp. 551–559.
16. Popoola O.O. Phenolic compounds composition and in vitro antioxidant activity of Nigerian Amaranthus viridis seed as affected by autoclaving and germination // Meas. Food. 2022. Vol. 6. 100028.
17. Mondor M., Melgar-Lalanne G., Hernández-Álvarez A.-J. Cold pressed amaranth (*Amaranthus tricolor*) oil. // Cold Pressed Oils. Elsevier, 2020. Pp. 113–127.
18. Ibrahim N.I., Fairus S., Zulfarina M.S., Naina Mohamed I. The efficacy of squalene in cardiovascular disease risk-a systematic review // Nutrients. 2020. Vol. 12. 414.
19. Ravi Kumar S., Narayan B., Sawada Y., Hosokawa M., Miyashita K. Combined effect of astaxanthin and squalene on oxidative stress in vivo // Mol. Cell. Biochem. 2016. Vol. 417. Pp. 57–65.
20. León-Camacho M., García-González D.L., Aparicio R. A detailed and comprehensive study of amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) oil fatty profile // Eur. Food Res. Technol. 2001. Vol. 213. Pp. 349–355.
21. Tang Y., Li X., Chen P.X., Zhang B., Liu R., Hernandez M., Draves J., Marcone M.F., Tsao R. Assessing the fatty acid, carotenoid, and tocopherol compositions of amaranth and quinoa seeds grown in Ontario and their overall contribution to nutritional quality // J. Agric. Food Chem. 2016. Vol. 64. Pp. 1103–1110.
22. Magwele M., Satekge T., Mpai S., Beta T., Van Staden J., Ndhlala A. Effects of Moringa-based phytostim biostimulant on the growth, nutritional composition, and antioxidant bioactivity of two amaranth species // South Afr. J. Bot. 2024. Vol. 173. Pp. 430–440.
23. Christodoulou M.C., Orellana Palacios J.C., Hesami G., Jafarzadeh S., Lorenzo J.M., Domínguez R., Moreno A., Hadidi M. Spectrophotometric methods for measurement of antioxidant activity in food and pharmaceuticals // Antioxidants. 2022. Vol. 11. 2213.
24. Madhuranga H.D.T., Samarakoon N.A. Methods for determining in vitro antioxidant activity: Methodologies for the DPPH, FRAP, and H_2O_2 assays // J. Nat. Ayurvedic Med. 2023. Vol. 7. 000431.
25. Dontha S. A review on antioxidant methods // Asian J. Pharm. Clin. Res. 2016. Vol. 9. Pp. 14–32.
26. Jing H., Kitts D. Antioxidant activity of sugar-lysine Maillard reaction products in cell free and cell culture systems // Archives of Biochemistry and Biophysics. 2004. Vol. 429, no. 2. Pp. 154–163. https://doi.org/10.1016/j.abb.2004.06.019.
27. Бриленок Н.С., Вершинин В.И., Бахарева М.В. Оценка антиоксидантной активности полифенолов по методу FRAP в присутствии комплексантов // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20, №3. С. 209–217. https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.3.004.
28. Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay // Free radical biology and medicine. 1999. Vol. 26(9-10). Pp. 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3.
29. Тринеева О.В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. №4. С. 180–197.
30. Стальная И.Д., Гаришвили Т.Г. Метод определения малонового диальдегида с помощью тиобарбитуровой кислоты // Современные методы в биохимии. М., 1977. С. 66–68.
31. Петрова А.А., Салищева О.В., Марков А.С. Влияние параметров сверхкритической CO_2-экстракции семян растения рода amaranthus на выход целевых компонентов // Молочная промышленность. 2025. №1. С. 55–63. https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-1-29.

32. Саноев А.И., Хидоятова Ш.К., Мукаррамов Н.И., Рахманбердыева Р.К., Маликова М.Х., Межлумян Л.Г., Сагдуллаев Ш.Ш., Гусакова С.Д. Влияние условий сверхкритической углекислотной экстракции жмыха амаранта на выход экстракта и содержание в нем сквалена // Химия растительного сырья. 2020. №2. С. 315–322. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020026257.
33. Патракова И.С., Гуринович Г.В., Салищева О.В., Патшина М.В., Иванцова К.А. Оценка антиоксидантной активности экстракта порошка кожуры граната // Вестник НГАУ. 2024. №1(70). С. 253–260. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-70-1-253-260.
34. Alvarez-Jubete L., Wijngaard H., Arendt E.K., Gallagher E. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking // Food Chemistry. 2010. Vol. 119, no. 2. Pp. 770–778. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032.
35. Azri A., Aydi S.S., Aydi S., Debouba M., Bouajila J., Cerny M., Valentin R., Tricoulet L., Galaup P., Merah O. Nutritional and Bioactive Lipid Composition of *Amaranthus* Seeds Grown in Varied Agro-Climatic Conditions in France // Agronomy. 2025. Vol. 15(3). 672. https://doi.org/10.3390/agronomy15030672.

Поступила в редакцию 5 июня 2025 г.

После переработки 16 июня 2026 г.

Принята к публикации 17 июня 2026 г.

Salishcheva O.V.[1], Petrova A.A.[1], Kotova T.V.[2,3], Yustratov V.P.[1]* AMARANTHUS AS A SOURCE OF BIOACTIVE COMPONENTS: ANTIOXIDANT ACTIVITY OF AMARANTHUS SEEDS EXTRACTS OBTAINED BY SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION

[1] Kemerovo State University, st. Krasnaya, 6, Kemerovo, 650000, Russia, salishchevaov@mail.ru
[2] Kemerovo State Medical University, st. Voroshilova, 22a, Kemerovo, 650056, Russia
[3] Ural State University of Economics, st. 8 Marta, 62/45, Ekaterinburg, 620144, Russia

The unique composition of lipophilic compounds, the presence of squalene, carotenoids, tocopherols, and unsaturated fatty acids in the CO_2 extracts of amaranth seeds provide its high antioxidant activity. The aim of the study was to determine the antioxidant activity of CO_2 extracts of amaranth seeds. As a result of supercritical CO_2 extraction, different fractions of amaranth oil were obtained from different separators. The effect of the CO_2 extraction process conditions, including oil separation conditions, on the antioxidant properties of the extracts, as well as the effect of amaranth oil storage conditions, was assessed. Antioxidant activity was determined by analyzing the ability of extracts to absorb DPPH radicals and by the ability to inhibit the oxidation of oleic acid. The best antioxidant activity was shown by the extract obtained under the following conditions: the lowest pressure at the separator outlet and the longest extraction time. This extract contains more squalene and unsaturated fatty acids. The extract obtained at the highest pressure and shorter exposure time showed lower activity. Under these conditions, fewer accompanying biologically active components are extracted, including squalene, and the ratio of unsaturated to saturated fatty acids changes. The results showed a decrease in the antioxidant activity of the amaranth extract by 3.8% when stored in the light for two months. The results of the studies are valuable for assessing potential sources of antioxidant compounds, the effect of extraction conditions and storage time of extracts on antioxidant properties, and for the purpose of obtaining functional products enriched with biologically active compounds.

Keywords: amaranthus, supercritical CO_2 extraction, bioantioxidants, antioxidant activity.

For citing: Salishcheva O.V., Petrova A.A., Kotova T.V., Yustratov V.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 3, pp. 290–299. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260317414.

References

1. Martinez-Lopez A., Millan-Linares M.C., Rodriguez-Martin N.M., Millan F., Montserrat-de la Paz S. *J. Funct. Foods*, 2020, vol. 65, 103735. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103735.
2. Balakrishnan G., Schneider R.G. *Foods*, 2022, vol. 11, 2442. https://doi.org/10.3390/foods11162442.
3. Rodríguez M., Tironi V.A. *Food Res. Int*., 2020, vol. 137, 109524. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109524.
4. Toimbayeva D., Saduakhasova S., Kamanova S. et al. *Foods*, 2025, vol. 14(9), 1603. https://doi.org/10.3390/foods14091603.
5. Karamac M., Gai F., Longato E., Meineri G., Janiak M.A., Amarowicz R., Peiretti P.G. *Antioxidants*, 2019, vol. 8, 173. https://doi.org/10.3390/antiox8060173.
6. Sharma G., Lakhawat S. *J. Pharmacogn. Phytochem.,* 2017, vol. 6, pp. 1488–1489.
7. Adetunji C.O., Michael O.S., Varm A. et al. *Biology and Biotechnology of Quinoa: Super Grain for Food Security*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021, pp. 373–396. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3832-9_17.
8. Bertelli A., Biagi M., Corsini M., Baini G., Cappellucci G., Miraldi E. *Foods*, 2021, vol. 10, 2595. https://doi.org/10.3390/foods10112595.
9. Alvarez-Jubete L., Wijngaard H., Arendt E.K., Gallagher E. *Food Chem*., 2010, vol. 119, pp. 770–778. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032.

* Corresponding author.

10. Tang Y., Tsao R. *Mol. Nutr. Food Res*., 2017, vol. 61, 1600767.
11. Schröter D., Neugart S., Schreiner M., Grune T., Rohn S., Ott C. *Nutrients*, 2019, vol. 11, 571.
12. Zhu F. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*., 2019, vol. 59, pp. 1521–1533.
13. Rodríguez M., Tironi V.A. *Food Res. Int*., 2020, vol. 137, 109524
14. Klimczak I., Małecka M., Pachołek B. *Food Nahr.,* 2002, vol. 46, pp. 184–186.
15. Bunzel M., Ralph J., Steinhart H. *Mol. Nutr. Food Res.,* 2005, vol. 49, pp. 551–559.
16. Popoola O.O. *Meas. Food*, 2022, vol. 6, 100028.
17. Mondor M., Melgar-Lalanne G., Hernández-Álvarez A.-J. *Cold Pressed Oils*. Elsevier, 2020, pp. 113–127.
18. Ibrahim N.I., Fairus S., Zulfarina M.S., Naina Mohamed I. *Nutrients*, 2020, vol. 12, 414.
19. Ravi Kumar S., Narayan B., Sawada Y., Hosokawa M., Miyashita K. *Mol. Cell. Biochem*., 2016, vol. 417, pp. 57–65.
20. León-Camacho M., García-González D.L., Aparicio R. *Eur. Food Res. Technol*., 2001, vol. 213, pp. 349–355.
21. Tang Y., Li X., Chen P.X., Zhang B., Liu R., Hernandez M., Draves J., Marcone M.F., Tsao R. *J. Agric. Food Chem*., 2016, vol. 64, pp. 1103–1110.
22. Magwele M., Satekge T., Mpai S., Beta T., Van Staden J., Ndhlala A. *South Afr. J. Bot*., 2024, vol. 173, pp. 430–440.
23. Christodoulou M.C., Orellana Palacios J.C., Hesami G., Jafarzadeh S., Lorenzo J.M., Domínguez R., Moreno A., Hadidi M. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, 2213.
24. Madhuranga H.D.T., Samarakoon N.A. *J. Nat. Ayurvedic Med*., 2023, vol. 7, 000431.
25. Dontha S. *Asian J. Pharm. Clin. Res*., 2016, vol. 9, pp. 14–32.
26. Jing H., Kitts D. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2004, vol. 429, no. 2, pp. 154–163. https://doi.org/10.1016/j.abb.2004.06.019.
27. Brilenok N.S., Vershinin V.I., Bakhareva M.V. *Analitika i kontrol'*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 209–217. https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.3.004. (in Russ.).
28. Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., Rice-Evans C. *Free radical biology and medicine*, 1999, vol. 26(9-10), pp. 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3.
29. Trineyeva O.V. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*, 2017, no. 4, pp. 180–197. (in Russ.).
30. Stal'naya I.D., Garishvili T.G. *Sovremennyye metody v biokhimii*. [Modern Methods in Biochemistry]. Moscow, 1977, pp. 66–68. (in Russ.).
31. Petrova A.A., Salishcheva O.V., Markov A.S. *Molochnaya promyshlennost'*, 2025, no. 1, pp. 55–63. https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-1-29. (in Russ.).
32. Sanoyev A.I., Khidoyatova Sh.K., Mukarramov N.I., Rakhmanberdyyeva R.K., Malikova M.Kh., Mezhlumyan L.G., Sagdullayev Sh.Sh., Gusakova S.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 2, pp. 315–322. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020026257. (in Russ.).
33. Patrakova I.S., Gurinovich G.V., Salishcheva O.V., Patshina M.V., Ivantsova K.A. *Vestnik NGAU*, 2024, no. 1(70), pp. 253–260. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-70-1-253-260. (in Russ.).
34. Alvarez-Jubete L., Wijngaard H., Arendt E.K., Gallagher E. *Food Chemistry*, 2010, vol. 119, no. 2, pp. 770–778. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032.
35. Azri A., Aydi S.S., Aydi S., Debouba M., Bouajila J., Cerny M., Valentin R., Tricoulet L., Galaup P., Merah O. *Agronomy*. 2025, vol. 15(3)*,* 672. https://doi.org/10.3390/agronomy15030672.

Received June 5, 2025

Revised June 16, 2026

Accepted June 17, 2026

Сведения об авторах

Салищева Олеся Владимировна – доктор химических наук, доцент, заведующая кафедрой общей и неорганической химии, onh@kemsu.ru, salishchevaov@mail.ru

Петрова Анна Андреевна – ассистент кафедры общей и неорганической химии, annapet1120@mail.ru

Котова Татьяна Вячеславовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры фармацевтической и общей химии, ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Технологии инновационного развития», t_kotova@inbox.ru

Юстратов Владимир Петрович – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии, onh@kemsu.ru

Information about authors

Salishcheva Olesya Vladimirovna – Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of General and Inorganic Chemistry, onh@kemsu.ru, salishchevaov@mail.ru

Petrova Anna Andreevna – Assistant Lecturer at the Department of General and Inorganic Chemistry, annapet1120@mail.ru

Kotova Tatyana Vyacheslavovna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Pharmaceutical and General Chemistry, Leading Researcher at the "Innovative Development Technologies" Research and Educational Center, t_kotova@inbox.ru

Yustratov Vladimir Petrovich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of General and Inorganic Chemistry, onh@kemsu.ru