

**АНТИОКСИДАНТНЫЙ И АНТИФЕРРОПТОЗНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ  
НЕКОТОРЫХ ПРИРОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ**А.А. Байжуманов<sup>1,2</sup>

adilbayzhumanov@biophys.msu.ru

Е.Ю. Паршина<sup>1,2</sup>

parshinae@gmail.com

А.И. Юсипович<sup>2</sup>

yusipovich@biophys.msu.ru

К.И. Морозова<sup>2</sup>Г. Лу<sup>1</sup>

6420190025@smbu.edu.cn

Ч. Ху<sup>1</sup>Ч. Ян<sup>1</sup>О.С. Соколова<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Университет МГУ–ППИ в Шэньчжэне, Шэньчжэнь, КНР<sup>2</sup> МГУ, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Общая антиоксидантная активность, суммарное содержание фенольных соединений, а также потенциальная способность предотвращать ферроптоз определены для некоторых природных экстрактов, применяемых в традиционной китайской медицине (*Dendrobium officinale*, *Ganoderma lucidum*, *Gastrodia elata*, *Cornus officinalis*, *Eucommia ulmoides*, *Cistanche deserticola*, *Astragalus membranaceus*, *Panax quinquefolium* и *Codonopsis pilosula*). Показано, что экстракты *Eucommia ulmoides*, *Cornus officinalis* и *Ganoderma lucidum* ингибируют реакцию Фентона, влияют на перекисное окисление липидов и обладают способностью подавлять ферроптоз. В то же время способность экстрактов ингибировать реакцию Фентона не всегда коррелировала со значениями антиоксидантной активности и содержанием фенольных соединений. Это указывает на возможный вклад в ингибирование других липофильных антиоксидантов нефенольной природы, содержащихся в экстрактах. Методом ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения с фурье-преобразованием показано, что антиоксидантные свойства большинства экстрактов обусловлены вторичными метаболитами фенольной природы, полисахаридами и терпеноидами, а антиферроптозные свойства экстрактов — наличием нефе-

**Ключевые слова**

Ферроптоз, природные экстракты, антиоксиданты, полифенолы, липосомы, ИК-спектроскопия, нарушенное полное внутреннее отражение

нольных соединений (терпеноидов). Предполагается, что присутствующие в этих экстрактах активные вещества обладают потенциалом для эффективного ингибирования ферроптоза. Полученные результаты могут помочь в разработке новых лекарственных препаратов для лечения патологий, обусловленных наличием ферроптоза

Поступила 09.12.2024

Принята 24.01.2025

© Автор(ы), 2025

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-44-00015) и бюро образования провинции Гуандун (КНР, инновационная группа № 2022КСХТD034). Спонсор не участвовал в разработке исследования, при сборе, анализе или интерпретации данных, в написании рукописи или в решении опубликовать результаты*

**Введение.** Ферроптоз — разновидность железозависимой клеточной смерти, описанная в 2012 г. [1] — обычно сопровождается накоплением железа и перекисным окислением липидов, что приводит к гибели клетки [2]. Причинами ферроптоза могут быть снижение активности глутатионпероксидазы, дефицит тиолов и другие факторы [3], которые приводят к снижению антиоксидантной активности и накоплению активных форм кислорода (АФК) в клетках. Недавние исследования показали, что ферроптоз тесно связан с патофизиологическими процессами многих заболеваний, включая онкологические, заболевания нервной системы, повреждения при ишемии и реперфузии, заболевания почек, диабет и его осложнения, различные заболевания крови и др. [4–7]. В запуске ферроптоза ключевую роль играет реакция Фентона [8]. Использование антиоксидантов, таких как витамин Е или глутатионпероксидаза 4, является эффективным способом снижения активности ферроптоза [9]. Некоторые экстракты, используемые в традиционной китайской медицине (ТКМ) [10, 11], содержат вещества, которые могут стимулировать ферроптоз в клетках части злокачественных опухолей или, наоборот, подавляя ферроптоз, повышать выживаемость кардиомиоцитов при ишемии [12]. Многие растительные препараты оказывают более мягкое и естественное по сравнению с синтетическими препаратами воздействие на организм человека, обладая широким спектром биологической активности и не вызывая привыкания.

Многие растительные препараты ТКМ известны антиоксидантными свойствами [13]. Такие препараты традиционно заваривают в кипящей воде и употребляют в виде супов или чая. Результаты предыдущего исследования показали, что водные экстракты некоторых препаратов ТКМ, включая *Eucommia ulmoides* Oliv., *Cistanche deserticola* Ma и *Cornus officinalis* Torr. ex Dur., имеют высокие значения общей антиоксидантной активности (ОАА)

среди других изученных ТКМ (*Dendrobium officinale* Kimura et Migo, *Ganoderma lucidum* Karst, *Gastrodia elata* Blume, *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge, *Panax quinquefolium* L. и *Codonopsis pilosula* Fransh) [14]. Препараты ТКМ также используют в виде спиртовых настоек, при этом терапевтическая эффективность водных и спиртовых экстрактов одних и тех же трав может различаться [15]. Ключевыми ингредиентами ТКМ являются полифенолы или фенольные соединения, терпеноиды, включая терпены, тритерпеноиды и сапонины, а также полисахариды, которые могут обладать терапевтическими и антиоксидантными свойствами (см., например, [16]).

Растительные фенольные соединения — основные антиоксиданты, поступающие с пищей [17–31], однако и другие вещества в составе ТКМ также могут демонстрировать антиоксидантную активность (таблица).

Полифенолы, или потенциальные антиоксиданты, представляют собой разнообразную группу органических соединений, обычно встречающихся в природе, и содержат одну или несколько фенольных групп. Они подразделяются на четыре основных класса: 1) фенольные кислоты; 2) флавоноиды; 3) стильбены; 4) лигнаны [32]. ИК-спектры различных полифенолов характеризуются наличием пиков, наблюдаемых в спектрах фенольных кислот и соответствующих валентным колебаниям связей (C=C) и (C–C), сопряженным колебаниям связей (C=C) и (C–C) в ароматических кольцах и колебаниям гидроксильных групп (ОН). В низкочастотной области спектра ( $\nu = 900 \dots 800 \text{ см}^{-1}$ ) также наблюдаются деформационные (C–H)- и (C–C)-колебания.

Терпены, выделяемые из природных источников, представляют собой полимерные соединения изопрена  $C_5H_8$ . Терпеноиды (изопреноиды) — модифицированные терпены, в которых присутствуют дополнительные метильные группы или атомы кислорода [33]. Они также могут быть линейными или циклическими (включая ароматические кольца). Сапонины (тритерпеновые или стероидные гликозиды) — подкласс терпеноидов, однако по структуре являются гликозидами — сахарами, которые обычно связаны с тритерпеном (или стероидами) с помощью гликозидной связи [34]. ИК-спектры терпеноидов характеризуются в основном наличием полос, характерных для гидроксильных (ОН), углерод-водородных (C–H) групп, групп C=C, C=O, а также связей C–O–C, особенно в случае сапонинов.

Полисахариды состоят из производных моносахаридов, ковалентно связанных гликозидными связями в линейной или разветвленной конфигурации [20]. В спектрах полисахаридов присутствуют полосы, характерные для колебаний связей ОН, C–O и гидроксильных групп вторичных спиртов и связи C–O–C (гликозидной).

Содержание биологически активных веществ в исследуемых экстрактах

Название	Используемая часть растения	Активные вещества	Литература
<i>Ganoderma lucidum</i> (Curtis) Karst	Склероции	Полисахариды, тритерпеноиды	[17, 18]
<i>Dendrobium officinale</i> Kimura et Migo	Стебель	Полисахариды, масла, глюкозиды, фенол-содержащие вещества	[19]
<i>Rapax quinquefolium</i> L.	Корни	Сапонины, фенолсодержащие вещества	[20]
<i>Gastrodia elata</i> Blume	Корневище	Гастродин (фенольный гликозид), некоторые органические кислоты, полисахариды	[21]
<i>Codonopsis pilosula</i> Franch	Корни	Аминокислоты, тритерпены, полисахариды (например, гликозиды)	[22]
<i>Astragalus membranaceus</i> (Fisch.) Bunge	Стебель	Фенолсодержащие вещества (флавоноиды), сапонины и полисахариды	[23]
<i>Cornus officinalis</i> Torr. ex Dur.	Ягоды	Монотерпеноиды-иридоиды (обычно в растениях в виде гликозидов), фенолсодержащие вещества и полисахариды (гликозиды)	[24, 25]
<i>Cistanche deserticola</i> Ma	Корни	Иридоиды, фенолсодержащие вещества и полисахариды (гликозиды)	[26]
<i>Eucommia ulmoides</i> Oliv.	Листья	Фенолсодержащие вещества (например, лигнаны), иридоиды, тритерпеноиды, аминокислоты	[27–30]

Антиоксидантная активность экстрактов зависит от наличия в составе экстрактов определенных химических соединений и их функциональных групп. Кроме того, в зависимости от соотношения водо- и жирорастворимых антиоксидантов в экстрактах ТКМ их антиоксидантная активность в различных клеточных компартментах может различаться [35].

*Цель работы* — выявление экстрактов ТКМ, содержащих потенциальные ингибиторы ферроптоза. Для этого идентифицированы основные активные вещества в спиртовых экстрактах препаратов ТКМ, опубликованных Министерством здравоохранения КНР: *D. officinale*, *G. lucidum*, *G. elata*, *C. officinalis*, *E. ulmoides*, *C. deserticola*, *A. membranaceus*, *P. quinquefolium* и *C. Pilosula*. Используя ИК-спектроскопию нарушенного полного внутреннего отражения с фурье-преобразованием (ИК-НПВО), были оценены общее количество полифенолов и общая антиоксидантная активность этих экстрактов, а также способность экстрактов ингибировать реакцию Фентона в липосомах.

**Материалы и методы.** *Приготовление спиртовых экстрактов ТКМ.* Экстракты приготовлены из сухих образцов промышленного сырья КНР в соответствии с ранее описанным протоколом [13]. Спиртовые экстракты приготовлены с использованием сухих препаратов стеблей *D. Officinale*, *A. membranaceus*, склероция *G. lucidum*, корневища *G. elata*, ягод *C. officinalis*, листьев *E. ulmoides*, корней *C. deserticola*, *P. quinquefolius* и *C. pilosula*. Сухие образцы сырья измельчали, а затем растирали в ступке до состояния мелкого порошка. Затем 0,25 г порошка сырья ТКМ смешивали с 5 мл 70%-ного раствора этанола и обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 30 мин. Настой охлаждали до комнатной температуры и центрифугировали в течение 10 мин, супернатант пропускали через фильтр *Millipore* (Merck KGaA, Германия) с размером пор 0,45 мкм. Фильтрат хранили в холодильнике при температуре 4 °С. Все измерения проводили в течение суток после экстракции.

**ИК-НПВО. Регистрация спектров.** ИК-спектры экстрактов ТКМ регистрировали спектрометром *Spectrum Two FT-IR* (PerkinElmer, США) в сочетании с приставкой для НПВО с оптическим окном из селенида цинка ZnSe. Предметные стекла с высушенным этанольным экстрактом ТКМ прижимали к поверхности кристалла ZnSe для обеспечения хорошего контакта между образцом и кристаллом. ИК-спектры регистрировали в диапазоне значений 550...4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 4 см<sup>-1</sup>, для каждого спектра регистрировали четыре накопления. Для каждого образца регистрировали и усредняли спектры в трех различных точках образца.

*Обработка данных.* Использовали демоверсию ПО *Origin* версии 2024 (OriginLab Corporation, США), для определения положения пиков. ИК-спектры поглощения рассчитывали из ИК-спектров пропускания. ИК-спектры стекла (подложки) вычитали из спектров экстрактов ТКМ перед обработкой. Применяли модуль *Peak Analyzer*, пики определяли с помощью первой производной спектра со сглаживанием Савицкого — Голая (полиномиальный порядок 2, точки окна 20, из анализа исключено 10 % низких пиков). Затем спектры нормированы к полосе асимметричных валентных колебаний связи  $\text{CH}_2$  ( $\sim 2924 \text{ см}^{-1}$ ).

*Определение суммарного содержания фенольных соединений (ССФ).* Суммарное содержание фенольных соединений определяли по методике с использованием реактива Фолина — Чокальтеу [25]: 0,05 мл спиртового экстракта образца смешивали с 0,5 мл 0,2 N реактива Фолина — Чокальтеу (Sigma-Aldrich, США). Смесь встряхивали в течение 1 мин. После инкубации в течение 5 мин при комнатной температуре к смеси добавляли 0,4 мл 1 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и снова встряхивали. После инкубации смеси в течение 15 мин измеряли оптическую плотность на спектрофотометре *Hitachi 556* (Hitachi, Япония) при длине волны 765 нм. В качестве калибровочного раствора применяли растворы галловой кислоты концентрацией 0...250 мкг/мл. Общее ССФ в водных экстрактах выражали в мг галловой кислоты (ГК)/г сухого вещества.

*Определение ОАА.* Общую антиоксидантную активность водных экстрактов оценивали по образованию окрашенного комплекса восстановленного железа с 2,4,6-трипиредилтриазином [36]: 25 мкл спиртового экстракта смешивали с 1,5 мл раствора FRAP. Реагент FRAP приготавливали смешиванием 2,5 мл 20 mM  $\text{FeCl}_3$ , 25 мл ацетатного буфера (pH = 3,6) и 2,5 мл раствора 10 mM 2,4,6-трис(2-пиридил)-s-триамина, растворенного в 40 mM HCl. Смесь инкубировали при температуре 37 °C в течение 10 мин, после чего измеряли поглощение при 593 нм спектрофотометром *Hitachi 556* (Hitachi, Япония). Результаты выражали в мкмоль эквивалента Fe(II) на 1 л экстрактов ТКМ.

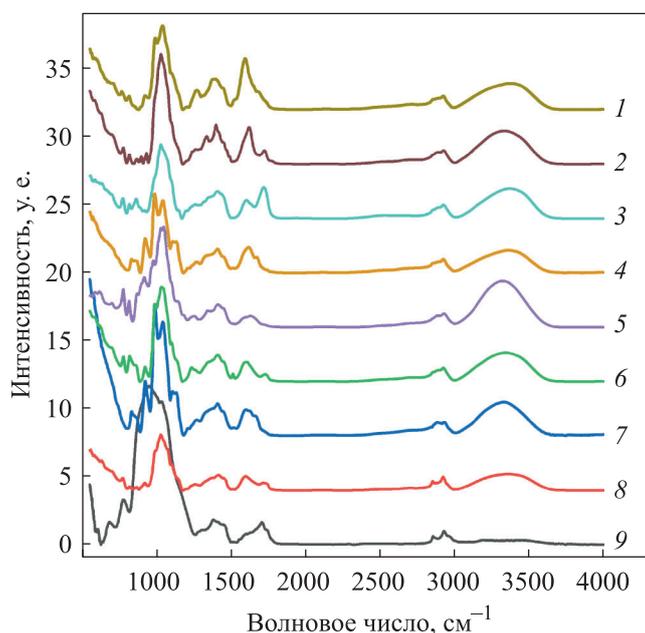
*Измерение 2-тиобарбитуровой кислотой активных продуктов в липосомах при запуске реакции Фентона.* Результаты анализа продуктов, реагирующих с 2-тиобарбитуровой кислотой (ТБК-АП), использовали для оценки концентрации малонового диальдегида, конечного продукта перекисного окисления липидов. Уменьшение количества ТБК-АП по сравнению с контролем указывает на способность экстрактов ТКМ защищать липидные бислои в липосомах, используемых в качестве модели плазматических

мембран, от перекисного окисления. Во время реакции Фентона, инициированной ионами  $Fe^{2+}$  и пероксидом водорода, степень перекисного окисления липидов в липосомах оценивали по количеству ТБК-АП.

Липосомы приготавливали в соответствии с протоколом, описанным в [37], из яичного желтка. Перекисное окисление липидов в липосомах вызывали реакцией Фентона после предварительной инкубации липосом с экстрактами ТКМ. Запуск перекисного окисления липидов в липосомах реакцией Фентона рассматривали как упрощенную модель ферроптоза. 376 мкл раствора липосом смешивали с 10 мкл спиртовых экстрактов ТКМ или 10 мкл 70%-ного этанола (в контрольных пробах) в течение 2 мин. Затем немедленно добавляли 10 мкл 8 мМ сульфата железа и 4 мкл 10 мМ  $H_2O_2$ , полученную смесь инкубировали в течение 30 мин при температуре 37 °С. Для оценки количества ТБК-АП 40 мкл образцов собирали сразу после добавления реагентов Фентона и через 30 мин инкубации. Каждый образец смешивали с 300 мкл 0,8%-ной 2-тиобарбитуровой кислоты, 300 мкл 20%-ной уксусной кислоты, 120 мкл деионизированной воды и 40 мкл 8,1%-ного додецилсульфата натрия. Смесь инкубировали в течение 1 ч при температуре 95 °С, затем охлаждали в течение 5 мин при температуре 4 °С. После охлаждения к смеси добавляли 200 мкл деионизированной воды и 1 мл бутанола, затем пробирки встряхивали и центрифугировали при 3000  $мин^{-1}$  в течение 10 мин. Поглощение измеряли в супернатанте при 532 нм. Для оценки содержания ТБК-АП для каждого экстракта рассчитывали разность значений поглощения, измеренных сразу после добавления реагентов Фентона и через 30 мин инкубации. Концентрацию ТБК-АП рассчитывали с использованием молярного коэффициента экстинкции ( $155 мМ^{-1} \cdot см^{-1}$ ) и выражали в мкмоль на литр липосом.

*Статистический анализ.* Статистический анализ выполнен с использованием демоверсии *GraphPad Prism v. 9.3.1* для *Windows* (GraphPad Software, США). Результаты представлены в виде медианы с интерквартильным размахом. Число независимых измерений не менее пяти в случае биохимических экспериментов и не менее трех при измерении ИК-спектров для каждого исследуемого экстракта. Значимость различий между группами оценивалась тестом Краскела — Уоллиса с апостериорным тестом Бенъямини, Кригера и Йакутили ( $p < 0,05$ ). Для оценки корреляции использован коэффициент корреляции Спирмена ( $p < 0,05$ ).

**Результаты и их обсуждение.** *Результаты исследования состава экстрактов ИК-фурье-спектроскопией.* Типичные ИК-спектры исследуемых высушенных образцов спиртовых экстрактов ТКМ показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Типичные ИК-спектры исследуемых высушенных образцов спиртовых экстрактов ТКМ (спектры нормализованы к полосе асимметричных валентных колебаний  $\text{CH}_2$ -связи,  $\sim 2924 \text{ cm}^{-1}$ ) *E. ulmoides* (1), *C. deserticola* (2), *C. officinalis* (3), *A. membranaceus* (4), *C. pilosula* (5), *G. elata* (6), *P. quinquefolium* (7), *D. officinale* (8), *G. lucidum* (9)

Присутствующие в спектрах пики обусловлены наличием различных функциональных групп в определенных конформациях. Полученные спектры представлены на рис. 1.

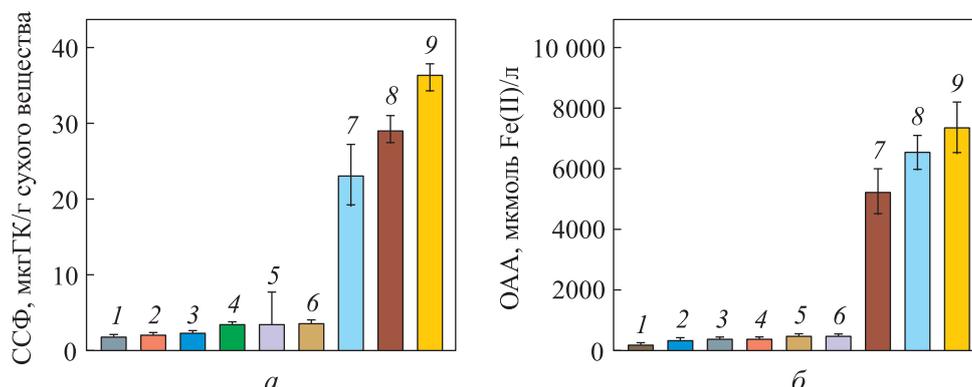
Полоса амида II, характерная для белков, отсутствовала в области  $1500 \dots 1560 \text{ cm}^{-1}$ : эта полоса обычно более интенсивна, чем другие амидные полосы (амид I и III), поэтому если полосы нет, то это свидетельствует об отсутствии белков в образцах.

Во всех спектрах имелись интенсивные пики в области  $850 \dots 1250 \text{ cm}^{-1}$ , обусловленные колебаниями полисахаридных групп. В частности, присутствовал пик, соответствующий колебаниям уникальной для полисахаридогликозидной связи (C–O–C). Эта группа полос наиболее выражена во всех спектрах, как и некоторые другие пики в ИК-спектрах, характерные для полисахаридов. Таким образом, исследованные экстракты содержали значительное количество полисахаридов (или сапонинов и других веществ, содержащих углеводные остатки).

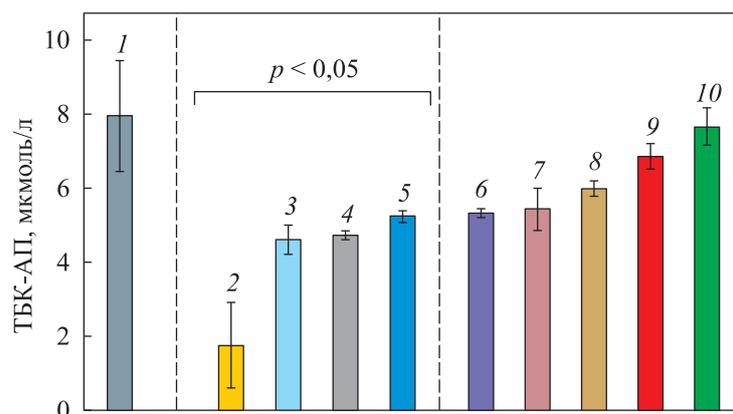
Полоса с максимумом примерно  $1605 \text{ cm}^{-1}$ , характерная для фенольных соединений, соответствует колебаниям ароматического кольца (связи  $\text{C}=\text{C}$

или С–С в сочетании с С=С в составе фенольного кольца). Наличие этой полосы может свидетельствовать о наличии фенольных соединений во всех исследованных экстрактах, за исключением экстракта *G. lucidum*, что в целом согласуется с данными ССФ. Полоса 2800...2950 см<sup>-1</sup> использована в качестве специфического маркера терпеноидов (липидов) и сапонинов. Терпены (терпеноиды) или сапонины присутствовали во всех наблюдаемых экстрактах. ИК-спектры *G. lucidum* сильно отличались от ИК-спектров других исследованных экстрактов. В этих спектрах отсутствует полоса в области 3200...3400 см<sup>-1</sup>, соответствующая колебаниям связей ОН. Интенсивность пиков, соответствующих колебаниям связей СН<sub>x</sub>, которые можно было бы отнести к присутствию терпенов (терпеноидов), липидов и/или жирных кислот, увеличивается. Таким образом, экстракт *G. lucidum* не содержит веществ с большим числом ОН-групп, например, фенольных соединений, что подтверждается данными ССФ. Наличие некоторых полос, характерных для ИК-спектра полисахаридов, в том числе полос гликозидной связи, предполагает наличие определенного количества полисахаридов (вероятно, сапонинов) в экстракте *G. lucidum*. В целом полученные данные согласуются с литературными и исследованные экстракты содержат достаточно большое число веществ, в том числе полифенолов или терпеноидов, которые могут быть потенциальными антиоксидантами.

*Оценка антиоксидантной активности.* Оценена антиоксидантная активность спиртовых экстрактов ТКМ в водной и липидной фазах, в которых измеряли значения ОАА и ТБК-АП. Кроме того, оценивали ССФ с использованием реагента Фолина — Чокалтеу. Антиоксидантные свойства девяти экстрактов, отсортированных в порядке возрастания, показаны на рис. 2 (значения ССФ и ОАА) и рис. 3 (значения ТБК-АП). Высокие значения ССФ или ОАА означают, что изучаемые экстракты содержат больше фенольных соединений или имеют более высокую антиоксидантную активность в исследуемых экстрактах. В случае ТБК-АП повышенные значения ТБК-АП означают меньшую антиоксидантную активность. Измеренные экстракты ТКМ способны защищать липидные бислои в липосомах, если наблюдаются существенные различия с результатами контроля. Оценка корреляций между значениями ССФ и ОАА или ТБК-АП позволяет проверить гипотезу о связи между антиоксидантным эффектом и концентрацией фенольных соединений. Показана корреляция ( $r = 0,817$ ,  $p = 0,011$ ) между значениями ССФ и ОАА. Высокие значения ССФ получены для *E. ulmoides* (36,580 [36,450; 37,790] мг ГК/г сухого порошка), *S. deserticola* (29,150 [27,500; 30,790] мг ГК/г сухого порошка) и *S. officinalis* (23,230



**Рис. 2.** Антиоксидантная активность девяти экстрактов ТКМ (экспериментальные данные отсортированы в порядке возрастания; результаты представлены как медиана с интерквартильным размахом):  
 а — суммарное содержание фенолов (*G. lucidum* (1), *D. officinale* (2), *P. quinquefolium* (3), *G. elata* (4), *C. pilosula* (5), *A. membranaceus* (6), *C. officinalis* (7), *C. deserticola* (8), *E. ulmoides* (9)); б — общая антиоксидантная активность (*G. elata* (1), *P. quinquefolium* (2), *G. lucidum* (3), *D. officinale* (4), *A. membranaceus* (5), *C. pilosula* (6), *C. deserticola* (7), *C. officinalis* (8), *E. ulmoides* (9))



**Рис. 3.** Содержание ТБК-АП в липосомах, инкубированных в экстрактах ТКМ (экспериментальные данные отсортированы в порядке возрастания; результаты представлены как медиана с интерквартильным размахом; значения ТБК-АП в липосомах, столбцы под линией достоверно отличаются от контроля; количество ТБК-АП при запуске реакции Фентона):  
 контроль (1), *E. ulmoides* (2), *C. officinalis* (3), *G. lucidum* (4), *P. quinquefolium* (5), *C. pilosula* (6), *C. deserticola* (7), *A. membranaceus* (8), *D. officinale* (9), *G. elata* (10)

[19,500; 27,500] мг ГК/г сухого порошка) (рис. 2, а). Не было установлено значимых различий этих параметров. Низкое значение ССФ наблюдалось у *G. lucidum* (2,089 [2,048; 2,174] мг ГК/г сухого порошка). В экспериментах по определению ОАА (рис. 2, б) наибольшие значения ОАА также наблю-

дались у *E. ulmoides* (7424 [7088; 8210] мкмоль Fe(II)/л), *C. officinalis* (6616 [5979; 6960] мкмоль Fe(II)/л) и *C. deserticola* (5267 [4935; 6050] мкмоль Fe(II)/л); значения существенно не отличались друг от друга. Наименьшее значение наблюдалось у *G. elata* (204,5 [194,0; 214,7] мкмоль Fe(II)/л). Таким образом, можно утверждать, что общая антиоксидантная активность зависела от концентрации полифенолов, содержащихся в экстрактах ТКМ. Некоторые различия результатов, полученных разными методами, можно объяснить наличием антиоксидантных соединений нефенольной природы, способных растворяться как в этаноле, так и воде (см. таблицу).

Другая ситуация наблюдалась в экспериментах по перекисному окислению липидов. Концентрация ТБК-АП не коррелировала с измеренными значениями ССФ и ОАА. Концентрация ТБК-АП в четырех из девяти оцененных экстрактов значительно отличалась от контроля (т. е. они имели антиоксидантную активность): *E. ulmoides* (1,78 [1,21; 3,55] мкмоль/л), *C. officinalis* (4,68 [4,25; 5,02] мкмоль/л), *G. lucidum* (4,78 [4,64; 4,86] мкмоль/л) и *P. quinquefolium* (5,31 [5,08; 5,37] мкмоль/л) (см. рис. 3) и не имели значимых различий. При этом экстракты, показавшие антиоксидантные свойства в этой модели, включают и экстракт гриба *G. lucidum*, который имел самое низкое значение ССФ из тех, что были измерены в этой работе. Таким образом, вполне вероятно, что ингибирование накопления ТБК-АП не всегда зависит от количества в экстрактах ССФ, а антиоксидантная активность экстрактов в случае индукции перекисного окисления липидов реакцией Фентона зависела не только от концентрации полифенолов. Возможно, что в случае с экстрактом *G. lucidum* ключевую роль сыграли нефенольные вещества, например, терпеноиды, полисахариды или сапонины, которые также присутствуют в экстрактах сырья и лучше растворяются в органических растворителях (липидах). Показано, что значения ССФ, измеренные в этанольных экстрактах (в настоящей работе) и водных экстрактах [14], хорошо коррелируют друг с другом ( $r = 0,900$ ,  $p = 0,002$ ), а также со значениями ОАА ( $r = 0,767$ ,  $p = 0,021$ ).

Следовательно, результаты, приведенные в [14] для аналогичного сырья и определенные аналогичными методами, но при использовании водных экстрактов, хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе. Основываясь только на результатах значений ССФ и ОАА для водных и спиртовых экстрактов, можно сделать вывод, что природа растворителя не имеет значения. Однако результаты по индукции перекисного окисления липидов в липосомах показали, что это не так. Значения ТБК-АП, измеренные в настоящей работе и в [14], где перекисное окисление липидов

запускали в плазме крови, не коррелировали друг с другом, но между значениями ССФ и ТБК-АП для водных экстрактов наблюдалась значимая обратная корреляция ( $r = -0,820$ ,  $p = 0,011$ ), в отличие от значений ССФ и ТБК-АП для спиртовых экстрактов. В случае спиртовых экстрактов отсутствие корреляции обусловлено использованием липосом в модели индукции перекисного окисления липидов. Возможно, спиртовые экстракты, показавшие защитный эффект, содержат антиоксидантные вещества амфифильной природы, которые лучше растворяются в мембранах липосом и, следовательно, защищают их от перекисного окисления липидов, вызванного запуском реакции Фентона. Активные формы кислорода, образующиеся в результате реакции Фентона, которая катализируется железом, способствуют иницированию ферроптоза. Однако хелаторы железа и некоторые липофильные антиоксиданты могут ингибировать ферроптоз, тем самым открывая потенциальные возможности борьбы с этим процессом [2].

**Заключение.** Согласно результатам экспериментов по ИК-спектроскопии, полисахариды и терпены (включая терпеноиды, тритерпеноиды или сапонины) обнаружены во всех исследованных экстрактах. Фенольные соединения обнаружены во всех экстрактах, за исключением экстракта *G. lucidum*. Среди проанализированных экстрактов *E. ulmoides*, который содержит различные биоактивные соединения, такие как полифенолы и тритерпеноиды, продемонстрировал наиболее высокую антиоксидантную активность. *E. ulmoides*, *C. officinalis* и *C. deserticola* показали высокую антиоксидантную активность, при этом существенных различий между ними не наблюдалось. Значения ОАА хорошо коррелировали с результатами ССФ. В модели перекисного окисления липидов, вызванного реакцией Фентона, экстракты *E. ulmoides*, *C. officinalis* и *G. lucidum* также продемонстрировали высокую антиоксидантную активность. Эти результаты не коррелировали с общей концентрацией полифенолов и значениями ССФ, что связано с механизмом антиоксидантного действия полисахаридов и терпеноидов, содержащихся в экстракте *G. lucidum*, который может хелатировать ионы двухвалентного железа, а также инактивировать гидроксильные радикалы [38]. Хотя экстракт *G. lucidum* содержит мало полифенолов, он способен эффективно ингибировать образование ТБК-АП в липосомах при запуске реакции Фентона.

Предположено, что три экстракта (*E. ulmoides*, *C. officinalis* и *G. lucidum*) содержат активные вещества, которые могут потенциально эффективно предотвращать ферроптоз, поскольку они заметно влияют на перекисное окисление липидов. На основе полученных результатов могут быть предло-

жены новые терапевтические средства для лечения заболеваний, связанных с ферроптозом.

#### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность инженеру 1 категории кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ Е.С. Трифоновой за вычитку рукописи статьи.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Dixon S.J., Lemberg K.M., Lamprecht M.R., et al. Ferroptosis: an iron-dependent form of nonapoptotic cell death. *Cell*, 2012, vol. 149, iss. 5, pp. 1060–1072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.042>
- [2] Li J., Cao F., Yin H.-L., et al. Ferroptosis: past, present and future. *Cell Death Dis.*, 2020, vol. 11, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2298-2>
- [3] Jiang X., Stockwell B.R., Conrad M. Ferroptosis: mechanisms, biology and role in disease. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.*, 2021, vol. 22, pp. 266–282. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00324-8>
- [4] Jiang Y., Zhao S., Zhou Y., et al. Research progress of traditional Chinese medicine in ferroptosis-related diseases. *Med. Nov. Technol. Devices*, 2022, vol. 16, art. 100193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100193>
- [5] Miao R., Fang X., Zhang Y., et al. Iron metabolism and ferroptosis in type 2 diabetes mellitus and complications: mechanisms and therapeutic opportunities. *Cell Death Dis.*, 2023, vol. 14, art. 186. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41419-023-05708-0>
- [6] Shi Y., Shi X., Zhao M., et al. Ferroptosis: a new mechanism of traditional Chinese medicine compounds for treating acute kidney injury. *Biomed. Pharmacother.*, 2023, vol. 163, art. 114849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114849>
- [7] Wang L., Huang H., Li X., et al. A review on the research progress of traditional Chinese medicine with anti-cancer effect targeting ferroptosis. *Chin. Med.*, 2023, vol. 18, art. 132. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13020-023-00838-1>
- [8] Lei P., Bai T., Sun Y. Mechanisms of ferroptosis and relations with regulated cell death: a review. *Front. Physiol.*, 2019, vol. 10, art. 139. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00139>
- [9] Zhang J.-J., Du J., Kong N., et al. Mechanisms and pharmacological applications of ferroptosis: a narrative review. *Ann. Transl. Med.*, 2021, vol. 9, no. 19, art. 1503. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm-21-1595>
- [10] Liu J., Jiang G., He P., et al. Mechanism of ferroptosis in traditional Chinese medicine for clinical treatment: a review. *Front. Pharmacol.*, 2023, vol. 13, art. 1108836. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1108836>
- [11] Zhu J., Shen P., Xu Y., et al. Ferroptosis: a new mechanism of traditional Chinese medicine for cancer treatment. *Front. Pharmacol.*, 2024, vol. 15, art. 1290120. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1290120>

- [12] Liu G., Xie X., Liao W., et al. Ferroptosis in cardiovascular disease. *Biomed. Pharmacother*, 2024, vol. 170, art. 116057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.116057>
- [13] He F., Chen J., Dong K., et al. Multi-technical analysis on the antioxidative capacity and total phenol contents of 94 traditional Chinese dietary medicinal herbs. *Food Sci. Nutr.*, 2018, vol. 6, iss. 6, pp. 1358–1369. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.689>
- [14] Байжуманов А.А., Май Л., Юсипович А.И. и др. Антиоксидантная активность некоторых водных экстрактов, применяемых в традиционной китайской медицине. *Вестник Московского Университета. Сер. 16. Биология*, 2022, т. 77, № 1, с. 16–21. EDN: TQUBHV
- [15] Bae J.-Y., Lee Y.-S., Han S.-Y., et al. A comparison between water and ethanol extracts of *Rumex acetosa* for protective effects on gastric ulcers in mice. *Biomol. Ther.*, 2012, vol. 20, iss. 4, pp. 425–430. DOI: <https://doi.org/10.4062/biomolther.2012.20.4.425>
- [16] Liu J., Henkel T. Traditional Chinese medicine (TCM): are polyphenols and saponins the key ingredients triggering biological activities? *Curr. Med. Chem.*, 2002, vol. 9, iss. 15, pp. 1483–1485. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/0929867023369709>
- [17] Ma B., Ren W., Zhou Y., et al. Triterpenoids from the spores of *Ganoderma lucidum*. *N. Am. J. Med. Sci.*, 2011, vol. 3, no. 11, pp. 495–498. DOI: <https://doi.org/10.4297/najms.2011.3495>
- [18] Wang Y.-Y., Li J.-Q., Liu H.-G., et al. Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) combined with chemometrics methods for the classification of Lingzhi species. *Molecules*, 2019, vol. 24, iss. 12, art. 2210. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24122210>
- [19] Tang H., Zhao T., Sheng Y., et al. *Dendrobium officinale* kimura et Migo: a review on its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, and industrialization. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.*, 2017, art. 7436259. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/7436259>
- [20] Kochan E., Szymańska G., Wielanek M., et al. The content of triterpene saponins and phenolic compounds in American ginseng hairy root extracts and their antioxidant and cytotoxic properties. *Plant Cell Tiss. Organ Cult.*, 2019, vol. 138, no. 10, pp. 353–362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01633-3>
- [21] Tang W., Eisenbrand G. *Gastrodia elata* Bl. In: Chinese Drugs of Plant Origin. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992, pp. 545–548. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8_71)
- [22] Tang W., Eisenbrand G. *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. In: Chinese Drugs of Plant Origin. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992, pp. 357–359. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8_46)
- [23] Bratkov V.M., Shkondrov A.M., Zdraveva P.K., et al. Flavonoids from the Genus *astragalus*: phytochemistry and biological activity. *Pharmacogn. Rev.*, 2016, vol. 10, no. 19, pp. 11–32. DOI: <https://doi.org/10.4103/0973-7847.176550>
- [24] Czerwińska M.E., Melzig M.F. *Cornus mas* and *Cornus officinalis* — analogies and differences of two medicinal plants traditionally used. *Front. Pharmacol.*, 2018, vol. 9, art. 894. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00894>

- [25] Klymenko S., Kucharska A.Z., Sokół-Łętowska A., et al. Iridoids, flavonoids, and antioxidant capacity of *Cornus mas*, *C. officinalis*, and *C. mas* × *C. officinalis* fruits. *Bio-molecules*, 2021, vol. 11, iss. 6, art. 776. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11060776>
- [26] Wang L., Ding H., Yu H., et al. *Cistanches herba*: chemical constituents and pharmacological effects. *Chin. Herb. Med.*, 2015, vol. 7, iss. 2, pp. 135–142. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1674-6384\(15\)60017-X](https://doi.org/10.1016/S1674-6384(15)60017-X)
- [27] Hou P., Wang Q., Qi W., et al. Comprehensive determination of seven polyphenols in *Eucommia ulmoides* and its anti-oxidative stress activity in *C. elegans*. *Food Measure.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 2903–2909. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00211-7>
- [28] Huang Q., Tan J.-B., Zeng X.-C., et al. Lignans and phenolic constituents from *Eucommia ulmoides* Oliver. *Nat. Prod. Res.*, 2021, vol. 35, iss. 20, pp. 3376–3383. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1700250>
- [29] Tanaka C., Nakamura T., Nakazawa Y., et al. A new triterpenoid from the leaves of *Eucommia ulmoides* Oliv. *Chem. Pharm. Bull.*, 1997, vol. 45, iss. 8, pp. 1379–1380. DOI: <https://doi.org/10.1248/cpb.45.1379>
- [30] Xing Y.-F., He D., Wang Y., et al. Chemical constituents, biological functions and pharmacological effects for comprehensive utilization of *Eucommia ulmoides* Oliver. *Food Sci. Hum. Wellness*, 2019, vol. 8, iss. 2, pp. 177–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.013>
- [31] Liguori I., Russo G., Curcio F., et al. Oxidative stress, aging, and diseases. *Clin. Interv. Aging*, 2018, vol. 13, pp. 757–772. DOI: <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513>
- [32] Pandey K.B., Rizvi S.I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxid. Med. Cell Longev.*, 2009, vol. 2, no. 5, pp. 270–278. DOI: <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>
- [33] Perveen S. Introductory chapter: terpenes and terpenoids. In: *Terpenes and Terpenoids — Recent Advances*. IntechOpen, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79683>
- [34] Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2007, vol. 47, iss. 3, pp. 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>
- [35] McLean J.A., Karadas F., Surai P.F., et al. Lipid-soluble and water-soluble antioxidant activities of the avian intestinal mucosa at different sites along the intestinal tract. *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.*, 2005, vol. 141, iss. 3, pp. 366–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2005.04.009>
- [36] Pankratova M.S., Baizhumanov A.A., Yusipovich A.I., et al. Imbalance in the blood antioxidant system in growth hormone-deficient children before and after 1 year of recombinant growth hormone therapy. *Peer J.*, 2015, vol. 3, art. e1055. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.1055>
- [37] Semenov A.N., Gvozdev D.A., Zlenko D.V., et al. Modulation of membrane microviscosity by protein-mediated carotenoid delivery as revealed by time-resolved fluorescence anisotropy. *Membranes*, 2022, vol. 12, iss. 10, art. 905. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12100905>

[38] Ahmad M.F., Alsayegh A.A., Ahmad F.A., et al. *Ganoderma lucidum*: insight into antimicrobial and antioxidant properties with development of secondary metabolites. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 3, art. e25607.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25607>

**Байжуманов Адиль Ануарович** — канд. биол. наук, старший преподаватель биологического факультета Университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1); старший научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

**Паршина Евгения Юрьевна** — канд. биол. наук, старший преподаватель биологического факультета Университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1); старший научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

**Юсипович Александр Иванович** — канд. биол. наук, старший научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

**Морозова Ксения Игоревна** — аспирант кафедры биофизики биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

**Лу Гоцзин** — аспирант биологического факультета университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1).

**Ху Чжунжуй** — сотрудник биологического факультета университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1).

**Ян Чао** — сотрудник биологического факультета университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1).

**Соколова Ольга Сергеевна** — д-р биол. наук, профессор биологического факультета Университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне (КНР, 518172, Гуандун, Шэньчжэнь, Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1); профессор кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Байжуманов А.А., Паршина Е.Ю., Юсипович А.И. и др. Антиоксидантный и антиферроптозный потенциал некоторых природных экстрактов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 4 (121), с. 113–133.

EDN: RVSRAС

## ANTIOXIDANT AND ANTIFERROPTOSIS POTENTIAL OF SOME NATURAL RAW MATERIAL EXTRACTS

A.A. Bayzhumanov<sup>1,2</sup>

E.Yu. Parshina<sup>1,2</sup>

A.I. Yusipovich<sup>2</sup>

K.I. Morozova<sup>2</sup>

G. Lu<sup>1</sup>

Zh. Hu<sup>1</sup>

Ch. Yang<sup>1</sup>

O.S. Sokolova<sup>1,2</sup>

adilbayzhumanov@biophys.msu.ru

parshinae@gmail.com

yusipovich@biophys.msu.ru

6420190025@smbu.edu.cn

<sup>1</sup> Shenzhen MSU–BIT University, Shenzhen, P.R. China

<sup>2</sup> MSU, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The study focused on the total antioxidant capacity (TAC) and total phenol content (TPC) of various natural raw material extracts, including *Dendrobium officinale*, *Ganoderma lucidum*, *Gastrodia elata*, *Cornus officinalis*, *Eucommia ulmoides*, *Cistanche deserticola*, *Astragalus membranaceus*, *Panax quinquefolium*, and *Codonopsis pilosula*. It was found that extracts from *Eucommia ulmoides*, *Cornus officinalis*, and *Ganoderma lucidum* effectively inhibited lipid peroxidation and, consequently, ferroptosis. Interestingly, the ability to inhibit ferroptosis was not necessarily linked to the TAC and TPC values, but rather to the amount of lipophilic antioxidants in the extracts. *Eucommia ulmoides*, *Cornus officinalis*, and *Cistanche deserticola* extracts contained the highest levels of polyphenols and TAC, while *Ganoderma lucidum* had the lowest levels. Analysis using ATR-FTIR spectra indicated that the antioxidant properties were primarily due to secondary metabolites of phenolic nature, polysaccharides, and terpenoids. The ability to prevent ferroptosis was attributed to the presence of non-phenolic substances, likely terpenoids, in the extracts. These findings suggest that these extracts have great potential in developing new therapeutic agents for ferroptosis-related diseases

### Keywords

*Ferroptosis, natural extracts, antioxidants phenolic compounds, liposomes, ATR-FTIR spectroscopy*

Received 09.12.2024

Accepted 24.01.2025

© Author(s), 2025

---

*The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-44-00015). This research also was funded by the Education Bureau of Guangdong Province, China “Innovation Team” (no. 2022KCXTD034). The sponsor was not involved in the design of the study, in the collection, analysis, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results*

## REFERENCES

- [1] Dixon S.J., Lemberg K.M., Lamprecht M.R., et al. Ferroptosis: an iron-dependent form of nonapoptotic cell death. *Cell*, 2012, vol. 149, iss. 5, pp. 1060–1072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.042>
- [2] Li J., Cao F., Yin H.-L., et al. Ferroptosis: past, present and future. *Cell Death Dis.*, 2020, vol. 11, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2298-2>
- [3] Jiang X., Stockwell B.R., Conrad M. Ferroptosis: mechanisms, biology and role in disease. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.*, 2021, vol. 22, pp. 266–282. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00324-8>
- [4] Jiang Y., Zhao S., Zhou Y., et al. Research progress of traditional Chinese medicine in ferroptosis-related diseases. *Med. Nov. Technol. Devices*, 2022, vol. 16, art. 100193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100193>
- [5] Miao R., Fang X., Zhang Y., et al. Iron metabolism and ferroptosis in type 2 diabetes mellitus and complications: mechanisms and therapeutic opportunities. *Cell Death Dis.*, 2023, vol. 14, art. 186. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41419-023-05708-0>
- [6] Shi Y., Shi X., Zhao M., et al. Ferroptosis: a new mechanism of traditional Chinese medicine compounds for treating acute kidney injury. *Biomed. Pharmacother.*, 2023, vol. 163, art. 114849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114849>
- [7] Wang L., Huang H., Li X., et al. A review on the research progress of traditional Chinese medicine with anti-cancer effect targeting ferroptosis. *Chin. Med.*, 2023, vol. 18, art. 132. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13020-023-00838-1>
- [8] Lei P., Bai T., Sun Y. Mechanisms of ferroptosis and relations with regulated cell death: a review. *Front. Physiol.*, 2019, vol. 10, art. 139. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00139>
- [9] Zhang J.-J., Du J., Kong N., et al. Mechanisms and pharmacological applications of ferroptosis: a narrative review. *Ann. Transl. Med.*, 2021, vol. 9, no. 19, art. 1503. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm-21-1595>
- [10] Liu J., Jiang G., He P., et al. Mechanism of ferroptosis in traditional Chinese medicine for clinical treatment: a review. *Front. Pharmacol.*, 2023, vol. 13, art. 1108836. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1108836>
- [11] Zhu J., Shen P., Xu Y., et al. Ferroptosis: a new mechanism of traditional Chinese medicine for cancer treatment. *Front. Pharmacol.*, 2024, vol. 15, art. 1290120. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1290120>
- [12] Liu G., Xie X., Liao W., et al. Ferroptosis in cardiovascular disease. *Biomed. Pharmacother.*, 2024, vol. 170, art. 116057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.116057>
- [13] He F., Chen J., Dong K., et al. Multi-technical analysis on the antioxidative capacity and total phenol contents of 94 traditional Chinese dietary medicinal herbs. *Food Sci. Nutr.*, 2018, vol. 6, iss. 6, pp. 1358–1369. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.689>

- [14] Bayzhumanov A.A., May L., Yusipovich A.I., et al. Antioxidant activity of certain aquatic extracts used in traditional Chinese medicine. *Moscow. Univ. Biol. Sci. Bull.*, 2022, vol. 77, no. 1, pp. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0096392522010011>
- [15] Bae J.-Y., Lee Y.-S., Han S.-Y., et al. A comparison between water and ethanol extracts of *Rumex acetosa* for protective effects on gastric ulcers in mice. *Biomol. Ther.*, 2012, vol. 20, iss. 4, pp. 425–430. DOI: <https://doi.org/10.4062/biomolther.2012.20.4.425>
- [16] Liu J., Henkel T. Traditional Chinese medicine (TCM): are polyphenols and saponins the key ingredients triggering biological activities? *Curr. Med. Chem.*, 2002, vol. 9, iss. 15, pp. 1483–1485. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/0929867023369709>
- [17] Ma B., Ren W., Zhou Y., et al. Triterpenoids from the spores of *Ganoderma lucidum*. *N. Am. J. Med. Sci.*, 2011, vol. 3, no. 11, pp. 495–498. DOI: <https://doi.org/10.4297/najms.2011.3495>
- [18] Wang Y.-Y., Li J.-Q., Liu H.-G., et al. Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) combined with chemometrics methods for the classification of Lingzhi species. *Molecules*, 2019, vol. 24, iss. 12, art. 2210. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24122210>
- [19] Tang H., Zhao T., Sheng Y., et al. *Dendrobium officinale* kimura et Migo: a review on its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, and industrialization. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.*, 2017, art. 7436259. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/7436259>
- [20] Kochan E., Szymańska G., Wielanek M., et al. The content of triterpene saponins and phenolic compounds in American ginseng hairy root extracts and their antioxidant and cytotoxic properties. *Plant Cell Tiss. Organ Cult.*, 2019, vol. 138, no. 10, pp. 353–362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01633-3>
- [21] Tang W., Eisenbrand G. *Gastrodia elata* Bl. In: Chinese Drugs of Plant Origin. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992, pp. 545–548. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8_71)
- [22] Tang W., Eisenbrand G. *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. In: Chinese Drugs of Plant Origin. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992, pp. 357–359. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73739-8_46)
- [23] Bratkov V.M., Shkondrov A.M., Zdraveva P.K., et al. Flavonoids from the Genus *astragalus*: phytochemistry and biological activity. *Pharmacogn. Rev.*, 2016, vol. 10, no. 19, pp. 11–32. DOI: <https://doi.org/10.4103/0973-7847.176550>
- [24] Czerwińska M.E., Melzig M.F. *Cornus mas* and *Cornus officinalis* — analogies and differences of two medicinal plants traditionally used. *Front. Pharmacol.*, 2018, vol. 9, art. 894. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00894>
- [25] Klymenko S., Kucharska A.Z., Sokół-Łętowska A., et al. Iridoids, flavonoids, and antioxidant capacity of *Cornus mas*, *C. officinalis*, and *C. mas* × *C. officinalis* fruits. *Biomolecules*, 2021, vol. 11, iss. 6, art. 776. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11060776>

- [26] Wang L., Ding H., Yu H., et al. *Cistanches herba*: chemical constituents and pharmacological effects. *Chin. Herb. Med.*, 2015, vol. 7, iss. 2, pp. 135–142.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1674-6384\(15\)60017-X](https://doi.org/10.1016/S1674-6384(15)60017-X)
- [27] Hou P., Wang Q., Qi W., et al. Comprehensive determination of seven polyphenols in *Eucommia ulmoides* and its anti-oxidative stress activity in *C. elegans*. *Food Measure.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 2903–2909. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00211-7>
- [28] Huang Q., Tan J.-B., Zeng X.-C., et al. Lignans and phenolic constituents from *Eucommia ulmoides* Oliver. *Nat. Prod. Res.*, 2021, vol. 35, iss. 20, pp. 3376–3383.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1700250>
- [29] Tanaka C., Nakamura T., Nakazawa Y., et al. A new triterpenoid from the leaves of *Eucommia ulmoides* Oliv. *Chem. Pharm. Bull.*, 1997, vol. 45, iss. 8, pp. 1379–1380.  
DOI: <https://doi.org/10.1248/cpb.45.1379>
- [30] Xing Y.-F., He D., Wang Y., et al. Chemical constituents, biological functions and pharmacological effects for comprehensive utilization of *Eucommia ulmoides* Oliver. *Food Sci. Hum. Wellness*, 2019, vol. 8, iss. 2, pp. 177–188.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.013>
- [31] Liguori I., Russo G., Curcio F., et al. Oxidative stress, aging, and diseases. *Clin. Interv. Aging*, 2018, vol. 13, pp. 757–772. DOI: <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513>
- [32] Pandey K.B., Rizvi S.I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxid. Med. Cell Longev.*, 2009, vol. 2, no. 5, pp. 270–278.  
DOI: <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>
- [33] Perveen S. Introductory chapter: terpenes and terpenoids. In: *Terpenes and Terpenoids — Recent Advances*. IntechOpen, 2018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79683>
- [34] Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2007, vol. 47, iss. 3, pp. 231–258.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>
- [35] McLean J.A., Karadas F., Surai P.F., et al. Lipid-soluble and water-soluble antioxidant activities of the avian intestinal mucosa at different sites along the intestinal tract. *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.*, 2005, vol. 141, iss. 3, pp. 366–372.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2005.04.009>
- [36] Pankratova M.S., Baizhumanov A.A., Yusipovich A.I., et al. Imbalance in the blood antioxidant system in growth hormone-deficient children before and after 1 year of recombinant growth hormone therapy. *Peer J.*, 2015, vol. 3, art. e1055.  
DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.1055>
- [37] Semenov A.N., Gvozdev D.A., Zlenko D.V., et al. Modulation of membrane microviscosity by protein-mediated carotenoid delivery as revealed by time-resolved fluorescence anisotropy. *Membranes*, 2022, vol. 12, iss. 10, art. 905.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12100905>

[38] Ahmad M.F., Alsayegh A.A., Ahmad F.A., et al. *Ganoderma lucidum*: insight into antimicrobial and antioxidant properties with development of secondary metabolites. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 3, art. e25607.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25607>

**Bayzhumanov A.A.** — Cand. Sc. (Biol.), Senior Lecturer, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China); Senior Research Assistant, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Parshina E.Yu.** — Cand. Sc. (Biol.), Senior Lecturer, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China); Senior Research Assistant, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Yusipovich A.I.** — Cand. Sc. (Biol.), Senior Research Assistant, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Morozova K.I.** — Post-Graduate Student, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Lu G.** — Post-Graduate Student, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China).

**Hu Zh.** — Staff Scientist, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China).

**Yang Ch.** — Staff Scientist, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China).

**Sokolova O.S.** — Dr. Sc. (Biol.), Professor, Faculty of Biology, Shenzhen MSU–BIT University (International University Park Road 1, Dayun New Town, Longgang District, Guangdong Province, Shenzhen, 518172 P.R. China); Professor, Department of Bioengineering, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Bayzhumanov A.A., Parshina E.Yu., Yusipovich A.I., et al. Antioxidant and anti-ferroptosis potential of some natural raw material extracts. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 4 (121), pp. 113–133 (in Russ.). EDN: RVSAC